

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Chemie

Studijní obor: Chemie životního prostředí



Nikola Traxmandlová

DISTRIBUCE VELIKOSTNĚ SEGREGOVANÉHO AEROSOLU
V MEZNÍ VRSTVĚ ATMOSFÉRY

Size segregated aerosol within atmospheric boundary layer

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Jan Hovorka, Ph.D.

Praha 2017

Prohlašuji, že jsem tuto závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu. Jsem si vědoma toho, že případné využití výsledků, získaných v této práci, mimo Univerzitu Karlovu v Praze je možné pouze po písemném souhlasu této univerzity.

V Praze dne 22. srpna 2017.

podpis

Na tomto místě bych chtěla poděkovat vedoucímu diplomové práce RNDr. Janu Hovorkovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, ochotu a trpělivost. Dále děkuji mé rodině, přátelům a manželovi za podporu v posledních týdnech i během celého studia.

Abstrakt

Blízkost industriálních zón a obytných čtvrtí je častý fenomén evropských měst mnohdy způsobující v těchto čtvrtích snížení kvality ovzduší. Cílem této práce bylo za pomoci dálkově řízené vzducholodi změřit koncentrace a velikostní distribuce aerosolu v mezní vrstvě atmosféry nad obytnou zónou a průmyslovým komplexem Škoda auto a.s. v Mladé Boleslavi a doplnit tak pozemní měření, které zde proběhlo v únoru a březnu roku 2013 a jehož výsledkem bylo zjištění, že průmysl a doprava nemají na kvalitu ovzduší ve městě výraznější vliv.

Během třinácti letů 11. 2. 2015 byly dvojicí aerosolových spektrometrů umístěných v gondole vzducholodi měřeny velikostní distribuce a koncentrace částic aerosolu o velikosti 11,5 nm – 10 μm s integrační dobou jedna vteřina nebo minuta dle modu měření SINGLE nebo SCAN. V modu SINGLE vzducholod' během jednoho letu nad obytnou čtvrtí a průmyslovým komplexem setrvala na jedné letové hladině, zatímco v modelu SCAN měnila letovou hladinu každé dvě minuty při letu pouze nad sportovním areálem v obytné zóně.

V SINGLE modu byly v průmyslovém areálu identifikovány zdrojem nanočástic, PM_{10} a $\text{PM}_{2,5}$ a hrubého aerosolu výduchy z lakoven a místo nakládky automobilů. Nicméně emise z těchto zdrojů nejsou transportovány nad rezidenční oblast. Mírně zvýšené koncentrace PM_{10} a nanočástic byly také naměřeny nad křižovatkami ale ne nad rychlostní komunikací R10. V modu SCAN byly zjištěny shluky nanočástic ve výšce 300-500 m, které byly postupně transportovány k povrchu sídliště. Obě měření potvrzují modelové řešení předchozí studie, že majoritním zdrojem PM_{10} jsou lokální topeniště v okolních obcích. Zjištění kontrastuje s výsledky studie v Ostravské čtvrti Radvanice a Bartovice, prokazující podstatný vliv průmyslu na kvalitu ovzduší.

Klíčová slova: atmosférický aerosol, počet a velikostní distribuce částic, vertikální profil, mezní vrstva atmosféry

Abstract

Phenomenon of industrial grounds placed near residential areas can be frequently detected in European cities, which may cause decrease of air quality in these areas. The aim of this diploma thesis is to determine level of concentration and size distribution of aerosol in the planetary boundary layer above the residential area and industrial complex of Škoda auto a.s. in Mladá Boleslav city by using remotely controlled airship. Thereby, the thesis extends terrestrial experiment realized in February and March 2013 which revealed no significant impact of industry and traffic on air quality.

Size distribution and concentration of aerosol particles in range from 11.5nm to 10 μ m with integration time one second or one minute (depending on measure mode - SINGLE or SCAN) was measured by two aerosol spectrometers placed in dirigible gondola during 13 flights on February 11, 2015. SINGLE mode lead the airship in one stable flight level during one flight above residential area and industrial complex of Škoda auto a.s. Whereas SCAN mode changed flight level every two minutes during the flight of airship above sports fields in residential zone only. Exhausts of car painting halls and place of automobile loading were identified as the sources of nanoparticles, PM₁ a PM_{2.5} and coarse aerosol in the industrial area using the SINGLE mode. Nevertheless, emissions from these sources are not transported above the residential area. Slightly increased concentrations of PM_x and nanoparticles were also measured above crossroads and above the R10 road.

SCAN mode revealed clusters of nanoparticles in the height of 300 – 500 meters. These were gradually transported to surface of housing estate. Both methods of measurement confirm the model solution of previous study that is the local fireplaces in surrounding villages are the majority source of PM₁. This finding contradicts results of similar study in Radvanice and Bartovice districts of Ostrava city where industry massively affects air quality.

Key words: atmospheric aerosol, particle number concentration and size distribution, vertical profile, boundary layer

Obsah

1. Úvod.....	7
2. Teoretická část.....	8
2.1. Atmosféra a atmosférický aerosol	8
2.2. Vznik a vlastnosti částic aerosolu	9
2.3. Vertikální distribuce aerosolu v mezní vrstvě atmosféry	11
2.4. Důsledky působení aerosolu	12
2.5. Metody měření aerosolu	14
2.6. Možnosti měření aerosolu v mezní vrstvě atmosféry	14
2.7. Stav ovzduší v Evropě a v ČR	16
3. Cíle práce.....	17
4. Praktická část.....	18
4.1. Lokalita	18
4.2. Sběr dat	18
4.3. Vyhodnocení dat	21
5. Výsledky a diskuze	22
5.1. Výsledky měření v modu SINGLE.....	22
5.2. Výsledky měření v modu SCAN	37
6. Závěr.....	44
7. Seznam literatury.....	47

1. Úvod

Vlivem lidské činnosti je ovzduší především v obydlených oblastech znečišťováno látkami různého složení. Ať už jde o SO_2 , NO_x , ozon nebo atmosférický aerosol, pro zjištění kvality ovzduší je v první řadě nutné identifikovat zdroje znečištění, druh znečišťující látky a její šíření v dané oblasti. Díky tomu je možné následně provést potřebná opatření ke zlepšení kvality ovzduší a minimalizovat tak dopad na lidské zdraví a životní prostředí.

V mezní vrstvě atmosféry, která je charakteristická přítomností turbulentního promíchávání, vznikajícího třením proudu vzduchu o terén, může být znečištění transportováno do velké vzdálenosti a do různých výšek mezní vrstvy. Proto se mimo stacionární měřicí stanice a satelity pro měření kvality ovzduší v menších oblastech stále častěji využívají letadla nebo bezpilotní prostředky, které jsou schopné zaznamenat okamžitou vertikální a horizontální distribuci znečišťujících látek.

V praktické části této práce je pozornost věnována distribuci atmosférického aerosolu v mezní vrstvě, konkrétně nad rozlehlým průmyslovým areálem Škoda Auto a.s. v Mladé Boleslavi. Za pomoci dálkové řízené vzducholodi a specializovaných měřících přístrojů byla ve spolupráci a městem Mladá Boleslav a společností AirshipClub.com uskutečněna měřicí kampaň, jejímž cílem bylo zjistit, zda intenzivní průmyslová výroba ovlivňuje kvalitu ovzduší v přilehlé rezidenční oblasti. Během třinácti letů byla v modu SINGLE měřena koncentrace nanočástic o velikosti 40 nm, PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ a hrubý aerosol (PM_{10} - PM_1), v modu SCAN potom celé velikostní spektrum v rozsahu od 11,5 nm do 10 μm .

Výsledky letových měření byly následně porovnány s výsledky pozemního měření, které zde proběhlo v roce 2013 a s měřením v industriální oblasti Radvanice-Bartovice v Ostravě z roku 2012.

2. Teoretická část

2.1. Atmosféra a atmosférický aerosol

Atmosféra (z řeckého *atmos* = pára, *sphaire* = koule) je plynný obal kosmických těles, která mají dostatečnou hmotnost na to, aby k sobě svou gravitační silou poutala plyny. První atmosféra, tvořená vodíkem a heliem, vznikla po zformování Země přibližně před 4-3,8 miliardami let. Během chladnutí povrchu a díky sopečné činnosti vznikla sekundární atmosféra složená z CH_4 a dalších uhlovodíků, CO_2 , NH_3 , N_2 a velkého množství vodní páry.

Po vzniku fotosyntézy u některých organismů se začal do atmosféry uvolňovat kyslík. Ten byl nejprve využit na oxidaci Fe^{2+} v oceánech, minerálů na zemském povrchu (FeS_2), uhlovodíků a NH_3 a následně se začal v atmosféře hromadit, až přibližně před 400 mil. let dosáhl dnešní koncentrace 21%. Pro většinu prvních živých organismů byl kyslík toxický (1).

Dnešní atmosféra Země je z největší části tvořena dusíkem (78%), kyslíkem (21%) a argonem (0,9%). V menší míře se zde vyskytuje CO_2 (0,04%), O_3 , vodní pára a ve stopovém množství CH_4 , H_2 a další prvky ze skupiny vzácných plynů (Ne, Kr). Složení atmosféry se v důsledku intenzivního promíchávání vzduchu do výšky přibližně 100 km nad úrovní moře nemění. Tato část atmosféry se nazývá homosféra. Ve větších výškách slábne intenzita promíchávání a složení vzduchu je dáno zejména difuzí. Nejsvrchnější část atmosféry se nazývá heterosféra, která je tvořena především vodíkem (2).

Další možností členění atmosféry je její rozdělení na mezní vrstvu atmosféry a volnou atmosféru. Mezní vrstva atmosféry (*Planetary Boundary Layer*) je 1-2 km silná vrstva vzduchu při povrchu země. Dochází v ní k turbulenci a intenzivnímu míchání vlivem tření proudu vzduchu o terén. Tloušťka mezní vrstvy se mění podle míry zdrsnění zemského povrchu, rychlosti proudění a intenzity vertikálního promíchávání vzduchu. Ve volné atmosféře je tření vzduchu o terén zanedbatelné (3). Děje probíhající v mezní vrstvě jsou velmi komplikované, ale pro studium transportu znečišťujících látek významné.

Přírozenou složkou atmosféry je atmosférický aerosol. Atmosférický aerosol je definován jako koloid, suspenze pevných, kapalných, nebo směsných částic v plynné složce atmosféry, stabilní alespoň pod dobu umožňující její detekci (4).

Částice aerosolu se liší chemickým složením, původem a velikostí, která má vliv na transport a odstraňování částic ze vzduchu a na jejich usazování v respiračním systému. Velikost aerosolových částic se vyjadřuje pomocí aerodynamického průměru. Aerodynamický průměr částice (d_{ae}) je definován jako průměr hypotetické kulové částice o hustotě 1gcm^{-3} , která ve stagnantní vrstvě vzduchu sedimentuje stejnou rychlostí, jako částice sledovaná (4). Pokud sledovaná částice sedimentuje stejnou rychlostí jako kapka vody, je aerodynamický průměr částice roven jejímu geometrickému průměru.

2.2. Vznik a vlastnosti částic aerosolu

Částice aerosolu lze podle způsobu vzniku rozdělit na primární a sekundární. Primární částice jsou emitovány přímo ze zdroje, zatímco sekundární vznikají v atmosféře jako důsledek chemických a fyzikálních procesů (chemické reakce, nukleace, kondenzace) nebo jsou v ovzduší resuspendovány větrem či lidskou činností, např. dopravou nebo těžbou. Primární částice mohou být přírodního či antropogenního původu. Mezi částice přírodního původu patří např. mořský sprej, spory hub, pylová zrna, části rostlin a hmyzu nebo produkty sopečné činnosti. Částice antropogenního původu vznikají při spalování fosilních paliv, dopravě, těžbě apod.

Aerosolové částice (PM – Particulate Matter), mají d_{ae} v rozsahu od jednoho nanometru do sto mikrometrů. Dle d_{ae} lze rozlišit hrubý ($1\text{--}10\text{ }\mu\text{m}$) a jemný ($<1\text{ }\mu\text{m}$) aerosol a částice o $d_{ae} < 0.1\text{ }\mu\text{m}$ se označují jako ultrajemný aerosol. V praxi jsou nejčastěji měřeny velikostní frakce PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ a PM_1 , tj. soubory částic o d_{ae} menších nežli 10, 2.5, 1 μm , přičemž částice hraničních velikostí jsou v tomto souboru obsaženy právě s 50% pravděpodobností. (5).

Hrubé částice vznikají obvykle působením mechanické síly na hmotu. Nejčastěji jsou tvořeny oxidy prvků zemské kůry (Si, Ca, Fe, Al...), prachem z dopravy, zemědělských výrob, těžby a průmyslu. Součástí hrubé frakce jsou

i látky biologického původu. Hrubé částice také vznikají při těžbě nerostných surovin a fosilních paliv (6).

Ve velikostní distribuci jemného aerosolu jsou rozlišovány dva módy – nukleační ($d_{ae} < 20 \text{ nm}$) a akumulární ($d_{ae} \sim 300 \text{ nm}$). Částice nukleačního modu jsou jednak produkty vysokoteplotních procesů nebo vznikají z plynných prekurzorů. Vznik nových částic aerosolu, neboli nukleace, je fázová změna, kdy z původně plynné fáze nejprve vznikají shluky = clustery (velikost kolem 1 nm), jejichž pevnost zvyšuje přítomnost molekul látek s nízkou tenzí nasycených par, jako jsou ve volné atmosféře aminy nebo kyselina sírová. Clustery mohou, dle podmínek v atmosféře, slučováním spolu navzájem nebo kondenzací látek s nízkou tenzí nasycených par vytvořit větší částice charakteristické podstatně delší dobou setrvání v atmosféře. Částice nukleačního modu mohou také koagulovat s částicemi akumulárního modu. Částice akumulárního modu jsou nejpočetnější velikostní skupinou aerosolu v troposféře. Vznikají koagulací částic nukleačního modu nebo kondenzací plynů, par a vody na již existujících částicích (3). Procesy koagulace a kondenzace jsou tím účinnější, čím je velikost částic menší. Velikost těmito procesy vznikajících částic však obvykle nepřekročí 1 μm . Hlavními složkami částic jemného aerosolu jsou sulfáty, nitráty, organický a elementární uhlík (7).

S velikostí částic souvisí doba jejich setrvání v atmosféře. Hrubé částice jsou z atmosféry odstraňovány sedimentací a nedostanou se příliš daleko od zdroje. Doba jejich setrvání v atmosféře se pohybuje okolo několika hodin do dvou dnů. Částice akumulárního modu v atmosféře zůstávají dny až týdny a mohou být přeneseny na mnohem větší vzdálenosti. Z atmosféry jsou odstraňovány především v mokré depozici. Částice nukleačního modu díky své reaktivitě rychle koagulují. V atmosféře obvykle setrvávají maximálně desítky minut (3). Mokrou depozicí (vertikální nebo horizontální) se z atmosféry odstraní největší podíl znečišťujících látek. V rámci vertikální mokré depozice jsou rozlišovány dva procesy – vymývání a vypršení. Zatím co u vypršení tvoří aerosol kondenzační jádra kapek, vymytí probíhá zachycením částic aerosolu již padajícími kapkami vody. Na celkové atmosférické depozici se podílí i horizontální mokrá depozice. Horizontální srážky také obsahují oproti dešťovým kapkám mnohem více minerálních látek, což je dáno menší velikostí kapek vody (3). Suchá depozice

(sedimentace, adheze na zemský povrch, difuze, konvektivní promíchávání) je v globálním měřítku méně významná (8). Ovlivňují ji zejména chemické vlastnosti aerosolu, vlastnosti povrchu, na který jsou látky deponovány a atmosférická turbulence. Atmosférická depozice se obvykle vyjadřuje jako hmotnost látky na jednotku plochy a časový úsek ($\text{g.m}^{-2}\text{rok}^{-1}$ nebo $\text{kg.km}^{-2}\text{rok}^{-1}$) (3).

2.3. Vertikální distribuce aerosolu v mezní vrstvě atmosféry

Vertikální distribuce hmoty nebo počtu částic aerosolu se značně liší. Hmotnost aerosolu v atmosféře je dána především přítomností hrubých částic. V troposféře je vertikální distribuce hmotnosti aerosolu monotónní funkcí výšky nad terénem. Obecně lze říci, že hmotnost aerosolu v atmosféře se se vzrůstající vzdáleností od zemského povrchu exponenciálně do určité výšky snižuje a poté zůstává téměř konstantní. Tento vztah lze vyjádřit vzorcem:

$$M(z) = M_{(0)} \exp (-z / H_p),$$

kde $M_{(0)}$ je přízemní koncentrace a H_p je funkcí kvality povrchu.

Naproti tomu počet částic se může se vzdáleností od zemského povrchu snižovat či zvyšovat, což je ovlivněno především lokálními zdroji aerosolu a velikostní distribucí aerosolu. Nad kontinentem má vertikální distribuce počtu částic obdobný průběh jako v případě hmoty částic, tedy u povrchu je částic nejvíce, směrem vzhůru počet klesá a nakonec stagnuje. Nad mořskou hladinou však může počet částic s rostoucí výškou stoupat či klesat a velikostní distribuce se mohou značně lišit. Mořská hladina je zároveň zdrojem i propadem (sink) ultrajemných částic. Nárůst počtu ultrajemných částic se zvětšující se výškou je dán sníženou možností jejich zpětného zachytu na hladině moře a nukleací ve vyšších vrstvách atmosféry. Počet částic s výškou stoupá také v polárních oblastech, což je dáno nízkým počtem přirozených přízemních zdrojů a vznikem nových částic ve vyšších vrstvách.

Na vertikální distribuci i horizontálním šíření aerosolu v mezní vrstvě atmosféry má velký vliv také turbulentní promíchávání vzduchu. Znečišťující látky mohou být od zdroje transportovány na velké vzdálenosti

a určení zdroje znečištění se tím stává mnohem obtížnější. Značný vliv na množství aerosolu v různých vrstvách troposféry mají také proměnlivé meteorologické podmínky, jako je např. tlaková níže a tlaková výše. Při vzestupu proudu vzduchu v oblastech nízkého tlaku dochází ke zlepšení podmínek rozptýlu znečištění a přízemní koncentrace škodlivin se snižují. Naopak během tlakové výše jsou znečišťující látky v prostoru rozptylovány špatně a koncentrace škodlivin při zemi stoupá (2).

2.4. Důsledky působení aerosolu

Přítomnost aerosolu v atmosféře ovlivňuje tepelnou bilanci Země a působí na ekosystémy, rostliny a živočichy.

Tepelnou bilanci Země ovlivňuje z hlediska přímého působení na atmosféru následujícími fyzikálními procesy: odráží nebo pohlcuje sluneční záření nebo odráží, pohlcuje a emituje tepelné záření Země. Za nepřímé působení aerosolu na atmosféru je považována tvorba kondenzačních jader oblak a ledových jader (9). Rozptyl a odraz solárního záření na částicích aerosolu a mracích má za následek ochlazování zemského povrchu, zatímco pohlcování tepelného záření Země skleníkovými plyny a mraky povrch země naopak ohřívá (10). Tyto jevy závisí na vlastnostech aerosolových částic a jejich distribuci v ovzduší a na kvalitě povrchu, např. na jeho albedu (2).

Významný je také vliv aerosolu na ekosystémy. Přímé působení škodlivin na rostliny, živočichy a půdu může zapříčinit změny ve struktuře a funkci ekosystémů, např. jejich samoregulační schopnost. Nepřímo působí přes depozici v životním prostředí a následnou asimilaci rostlinami a živočichy. Tím škodlivé látky kontaminují celý potravní řetězec (11). Depozice znečišťujících látek je také jednou z cest vedoucích k acidifikaci jezer a vodních toků, ke změnám v rovnováze živin v pobřežních vodách a povodí toků, zvýšené eutrofizaci, vyčerpání zásob živin v půdě, poškození lesů a zemědělské půdy a k narušení biodiverzity (12).

Krátkodobé působení aerosolu na rostliny má vliv především na vznik nekrotických lézí na listech a je dobře rozpoznatelné. Při dlouhodobé expozici se toxické látky hromadí a integrují v těle rostliny (12). U rostlin následně dochází

k poškození listů, průduchů, snížení fotosyntetické aktivity, poškození permeability membrán, snížení růstu a výtěžnosti citlivých rostlinných druhů (13).

Podstatná část studií, zabývajících se důsledky přítomnosti aerosolu v atmosféře, je věnována působení aerosolu na lidský organismus. Limitní hodnoty koncentrace aerosolu a ostatních škodlivých látek, vyskytujících se v ovzduší, jsou mnohem menší (koncentrace uváděny v $\mu\text{g m}^{-3}$) než limitní hodnoty koncentrací škodlivin ve vodě (mg m^{-3}). Důvodem je mnohem větší množství vzduchu, které člověkem projde za určitý časový úsek (15-20 m^3 vzduchu, tj 13-26 kg, a pouze 1-2 l vody za 24 h). Vliv znečištění se u každého jedince může projevovat jinak. Záleží např. na době a intenzitě expozice nebo na věku a zdravotním stavu jedince.

Částice aerosolu jsou schopny na sebe vázat toxické látky, které se s jejich pomocí dostanou do organismu. Pro člověka jsou nejnebezpečnější částice o velikosti kolem 40 nm. Díky své velikosti jsou schopny projít dýchacím ústrojím bez zachycení až do plic, kde se s vysokou účinností zachytávají v plicních sklípcích. Odtud jsou následně krví distribuovány do celého těla. Hrubé částice jsou většinou zachyceny v horních cestách dýchacích, případně v průduškách, dráždí sliznice a oči, ale nezpůsobují vážnější onemocnění. Nejrizikovějšími skupinami jsou především fyzicky aktivní děti, starší lidé a lidé s onemocněním plic a srdce a s cukrovkou. Při fyzické aktivitě se dech zrychluje a prohlubuje, plicemi projde mnohem více vzduchu a tedy i více škodlivin zachycených na částicích aerosolu (14).

Dlouhodobé působení částic aerosolu na člověka může mít za následek plicní onemocnění, PM-indukované poškození plic, pulmonální a systémový oxidativní stres, záněty, aterosklerózu, kardiovaskulární poruchy, změny v autonomní činnosti srdce, ovlivnění imunity a může vést až k předčasné smrti (6; 14). S působením nanočástic je spojován i zvýšený výskyt astmatických onemocnění (15; 16) a alergií (8). Krátkodobá expozice způsobuje dýchací potíže, podráždění sliznic, astmatické záchvaty, akutní bronchitidy, infarkt nebo srdeční arytmií. Neméně významné jsou také mutagenní účinky aerosolu, kdy silná nebo dlouhodobá expozice může vést ke změně genetické informace organismu. (14).

2.5. Metody měření aerosolu

Monitorováním koncentrace znečišťujících látek v ovzduší a následným porovnáváním výsledků s imisními limity se hodnotí kvalita ovzduší. Měření koncentrací škodlivin může probíhat automaticky s využitím kontinuálně pracujících měřicích přístrojů, nebo manuálně.

Měření aerosolu probíhá jako odběr polutantu a následná laboratorní analýza, nebo měření on-line pomocí různých měřicích přístrojů.

První přístup má mnoho nevýhod, např. může docházet ke změně nebo poškození materiálu při transportu, je zjištěn pouze časový průměr, nikoliv okamžitá koncentrace, a výsledky nejsou okamžitě dostupné (17). Potřeba je také laboratorní vybavení a kvalifikovaný personál. Jako příklad metody lze uvést např. gravimetrii (manuální měření). Gravimetricky se množství aerosolu stanovuje jako rozdíl hmotnosti čistého filtru a filtru po expozici znečišťujícími látkami. Výhodou laboratorních metod je přímé měření hmotnostní koncentrace aerosolu v ovzduší.

Naproti tomu, měření on-line jsou mnohem rychlejší a umožňují zjistit bližší charakteristiky částic.

Většinou jde o optické měřicí přístroje, které zajišťují spolehlivý kontinuální a automatizovaný monitoring. Jsou založeny na rozptylu světla buď v celém objemu nasávaného vzduchu, nebo na rozptylu světla na jednotlivých částicích. V případě měřicích přístrojů prvního typu je vysílán laserový paprsek do měřicí komory, a následně je zařízením v úhlu θ ke zdroji záření měřen rozptyl světla. Úhel θ se může u různých přístrojů lišit ($20^\circ, 45^\circ, 70^\circ$). V přístrojích druhého typu je měřen rozptyl světla z optického laseru na každé částici. Podle intenzity světelného pulsu je možné odhadnout velikost částice a podle počtu pulsů počet částic. (18).

2.6. Možnosti měření aerosolu v mezní vrstvě atmosféry

Mezní vrstva atmosféry je ovlivněna výměnou tepla, vodní páry, stopových plynů a částic aerosolu se zemským povrchem (19). Tyto přenosy významně ovlivňují distribuci aerosolu v mezní vrstvě a tím i expozici obyvatelstva a životního prostředí znečišťujícími látkami (20; 21). Měření aerosolu v mezní

vrstvě atmosféry může být realizováno pomocí pozemních měřících stanic, satelitní sítě, systému LIDAR (22), letadel (23; 24) nebo bezpilotních zařízení – dronů (25; 26) a vzducholodí (20; 27).

Přízemní koncentraci polutantů stanovují pozemní měřící stanice, které odebírají a analyzují vzorek vzduchu z blízkého okolí. Tato měření jsou obvykle realizována po delší časový úsek, aby se setřely rozdíly koncentrací vyvolané náhodnými změnami v ovzduší. Další možností je měření pomocí systému LIDAR (Light detection and Ranging), který je založen na rozptylu laserového paprsku na molekulách plynu nebo částicích aerosolu. Nevýhodou lidarového měření je nižší přesnost a nemožnost využití za ztížených podmínek (vysoká prašnost, hustá mlha) (28).

Pomocí klasického satelitního měření je možné monitorovat koncentraci škodlivé látky na rozlehlých plochách, z výsledků však není jasné, v jaké výšce se znečištění nachází. Pro doplnění informace o vertikální distribuci jsou stále častěji realizována letová měření, která oproti výše uvedeným metodám přinášejí řadu výhod. Za pomoci letadel, dronů nebo vzducholodí může být monitorováno velké území a to v různých výškách během poměrně krátké doby. Z těchto prostředků jsou k měření znečištění ovzduší nejčastěji využívána letadla, jejichž provoz je však velmi finančně náročný. Výraznou nevýhodou měření s pomocí letadel je také omezená letová hladina – letadla se mohou pohybovat ve výšce minimálně 150 m nad zemí. Oproti tomu bezpilotní prostředky mohou proměřit atmosféru i do výšky 150 m a zaznamenat tak kompletní vertikální distribuci znečišťujících látek od povrchu vzhůru.

Pro letová měření jsou nejvhodnější dálkově ovládané vzducholodě. Na rozdíl od dronů vzducholodě nevíří atmosféru a nezpůsobují tak nepřesnou vertikální a horizontální lokalizaci dat. Výhodou vzducholodí je také jejich velké užitečné zatížení a dlouhá výdrž baterie. Na jedno nabití mohou vzducholodě nalétat desítky kilometrů a získat tak informace, které vhodně doplní data získaná z pozemních měřících stanic.

Na potřebu a výhody měření kvality ovzduší za pomoci vzducholodí jako jedni z prvních upozornili W.A. Hoppel a G.M. Frick, kteří v 90. letech měřili aerosol a stopové plyny (NO_x , SO_2 , ozon) v mezní vrstvě atmosféry nad mořskou hladinou (29; 30). Doposud bylo ve světě letových měření realizováno velmi

málo. Za větší měřicí kampaň lze považovat evropský projekt PEGASOS (Pan-European Gas Aerosol Climate Interaction Study), během kterého vzducholod' Zeppelin NT měřila v různých evropských zemích množství aerosolu, stopových plynů nebo fotochemické procesy v atmosféře (např. vznik nových částic – NPF) (31; 32). V ČR jsou menší letecké měřicí kampaně realizovány laboratorii pro studium kvality ovzduší na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy.

2.7. Stav ovzduší v Evropě a v ČR

Zájem o zkoumání atmosférických aerosolů radikálně stoupl v posledních několika desetiletích, motivován globálními změnami podnebí, nepříznivými vlivy na zdraví a zvěšujícím se znečištěním z dopravy (8). Ve většině evropských zemí se kvalita vzduchu za posledních několik desetiletí značně zlepšila. Přesto bylo zjištěno, že expozice polutantům, jako jsou např. aerosol nebo ozon, zapříčiňuje v mnoha zemích nárůst hospitalizací (7). V současné době se na podílu PM v Evropě podílí především silniční doprava, průmysl a spalování v domácnostech (33).

Pozadové hodnoty PM₁₀ na venkově v některých rozvinutých evropských zemích (Belgie, Nizozemsko, SZ Německo) stoupají. Naopak v jižní, centrální a východní Evropě mají vzrůstající tendenci hodnoty PM₁₀ ve městech a klesají v severských zemích. V blízkosti intenzivní dopravy nebo průmyslových zón (tzv. Hot-spots) jsou hodnoty PM₁₀ a PM_{2.5} až 40 % nad městskou pozadovou hodnotou. Hodnoty PM_{2.5} jsou v porovnání s ostatními zeměmi nižší ve skandinávských městech. Hodnoty PM₁ jsou v evropských zemích přibližně poloviční, než hodnoty PM₁₀ (33).

Pravidelná měření kvality ovzduší v České republice probíhají od šedesátých let. Česká republika má jednu s nejhustějších monitorovacích sítí v Evropě. Hlavním orgánem pro měření kvality ovzduší je Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ). Společně s ním se kvalitou ovzduší zabývají další menší organizace.

V minulosti byla největším a dlouhodobým zdrojem znečištění severozápadní oblast ČR, kde byla od padesátých let provozována síť uhelných elektráren (34). Situace se od sedmdesátých let začala řešit (počátky měření SO₂)

a v devadesátých letech se začaly měřit i koncentrace TSP (Total Suspended Particles) a PM₁₀ (35).

V současnosti se průměrné roční hodnoty PM₁₀ dlouhodobě drží pod hodnotou imisního limitu ($40\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), průměrné roční hodnoty PM_{2.5} ($25\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) kolísají kolem hodnoty imisního limitu (36).

Poměr PM₁₀ a PM_{2.5} vykazuje pravidelný roční průběh. V zimě se vyskytuje větší podíl PM_{2.5} (vytápění), na jaře a začátkem léta opět narůstá frakce PM₁₀, což je v některých zdrojích přisuzováno nárůstu větších částic biogenního původu v ovzduší (37).

Nejvyšší koncentrace PM₁₀ a PM_{2.5} jsou vykazovány v chladných měsících. Souvisí to se zhoršenými rozptylovými podmínkami, které jsou častější v zimě, a s větším využíváním tepelných zdrojů, například lokálních topenišť (36).

Významným zdrojem PM₁₀, PM_{2.5} a dalších látek jsou lokální topeniště. Pozornost je jim však věnována až od prvního desetiletí 21. století, do té doby se zájem upíral pouze na velké a střední zdroje znečištění. Lokální topeniště jsou přitom společně s emisemi z dopravy jedním z největších zdrojů emisí zatěžujících obyvatelstvo (38). Lokální topeniště se v ČR podílí na primárních emisích PM₁₀ 41 % a PM_{2.5} 59%. Primární emise PM₁₀ a PM_{2.5} z veřejné energetiky a výroby tepla tvoří pouze 8%. Na primárních emisích benzo[a]pyrenu se lokální topeniště podílí dokonce 90% (39).

3. Cíle práce

Cílem práce bylo s pomocí dálkově říditelné vzducholodi změřit v ovzduší nad částí průmyslového komplexu Škoda Auto a přilehlou obytnou zónou v Mladé Boleslavi prostorovou distribuci velikostně rozlišeného atmosférického aerosolu, zobrazit naměřená data v mapových podkladech, diskutovat možné zdroje aerosolu a jejich vliv na městské ovzduší a porovnat výsledky měření se studií rozlišující zdroje v urbánní atmosféře Mladé Boleslavi a s podobnou situací v rezidenční čtvrti v blízkosti průmyslového komplexu v městské čtvrti Radvanice - Bartovice v Ostravě.

4. Praktická část

4.1. Lokalita

Měření probíhalo dne 11. 2. 2015 v Mladé Boleslavi nad automobilkou Škoda Auto a.s. a přilehlým sídlištěm. Město Mladá Boleslav leží ve středočeském kraji ve výšce 235 m.n.m., terén je rovinatý. Závod Škoda Auto je umístěn v severovýchodní části města a rozkládá se na ploše 2,5 km². Ze severozápadu a jihozápadu přiléhají k závodu obytné části města. V roce 2015 bylo v Mladé Boleslavi a v Kvasínách vyrobeno více než půl milionu automobilů (40). Vzhledem k vysoké produkci je zde předpokládán částečný únik částic průmyslového aerosolu do vnějšího ovzduší.

Jako místo vhodné pro vzlety a přistání vzducholodi byl zvolen stadion Jana Železného (50°25'32.50''N, 14°54'54.42''E).

4.2. Sběr dat

Data byla získána z měřících přístrojů, umístěných v gondole dálkově ovládané vzducholodi firmy AirshipClub.com. Vzducholod' o délce 11 m a objemu 40 m³ byla poháněna dvojicí vrtulí s proměnným náklonem upevněné na hřídeli elektromotorů napájených z opakovaně nabíjených baterií. Doba jednoho letu se pohybovala mezi 60-90 minutami. Vzducholod' s maximální rychlostí 6-7 ms⁻¹ je schopna vystoupat do výšky až 1 600 m, přičemž nejmenší výška potřebná pro bezproblémový let je okolo 50 m nad zemí. Celkem bylo během dne uskutečněno 13 letů, přičemž trasu jednotlivých letů lze předem naplánovat. Časy vzletů a přistání jsou uvedeny v tabulce 1 (Greenwichský čas).

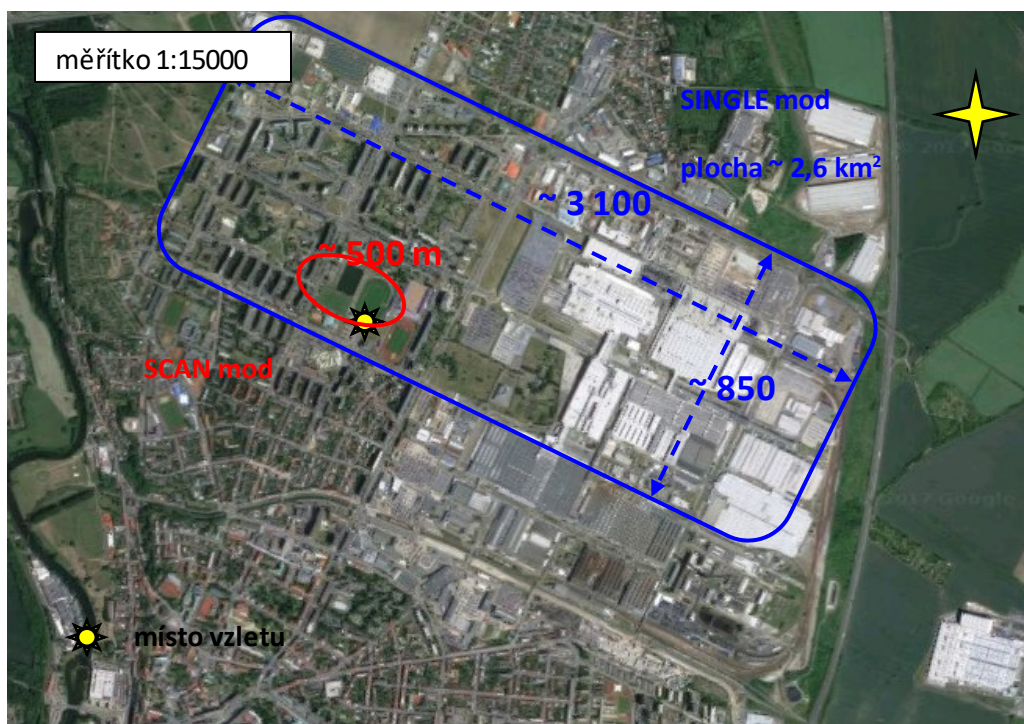
Data byla zaznamenána pomocí měřících přístrojů Optical Particle Sizer 3330 (OPS, výrobce spol. TSI) a NanoScan SMPS Model 3910 (výrobce spol. TSI), které oba měří velikostní distribuci aerosolu. Přístroj OPS zaznamenává koncentraci částic na základě rozptylu světla, jehož zdrojem je laserová dioda (viz. optické přístroje kap. 1.5. – Metody měření aerosolu). Ve spektrometru NanoScan jsou částice nejprve rozděleny v proměnném elektrickém poli do velikostních skupin a poté jsou počty částic v těchto skupinách spočítané v integrovaném kondenzačním čítači částic. Oba přístroje byly umístěny ve

speciální gondole s vyhřívanou vzorkovací hlavicí na 50 °C. Tímto bylo zabráněno kondenzaci vzdušné vlhkosti a vzorkování kapiček vody v detektorech přístrojů.

Výstupem měření přístroje OPS jsou koncentrace částic ve velikostním rozmezí 0,338 – 9,051 μm , rozdělené do šestnácti velikostních frakcí. Pro účely této práce jsou nejdůležitější velikostní frakce PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ a $\text{PM}_{1.0}$ (k $\text{PM}_{2.5}$ a $\text{PM}_{1.0}$ jsou stanoveny pevné imisní limity). Koncentrace částic byly zaznamenány každou vteřinu.

Měřicí přístroj NanoScan pracuje ve dvou modech. V modu SINGLE zaznamenává koncentraci vybrané velikostní frakce každou vteřinu. Pro lety v tomto modu byla zvolena velikost částic 40 nm, která indikuje spalovací procesy. V modu SCAN přístroj zaznamenává každou vteřinu koncentrace částic velikostního spektra od 11,5 nm do 365,2 nm a výstupem jsou jejich minutové průměry.

V případě letů v modu SINGLE byla naplánována plocha zájmového území. Rozloha území, nad kterým se vzducholod' pohybovala, je naznačena na obr. 1. Vzducholod' se během SINGLE letů pohybovala ve stejné výškové hladině. V případě letů v modu SCAN vzducholod' létala pouze nad hřištěm Jana Železného v jedné linii a v intervalu cca 1 – 2 minuty měnila výšku od 50 m až po maximálně 600 m nad zemí během jednoho letu. Přehled letů je uveden v tabulce 1.



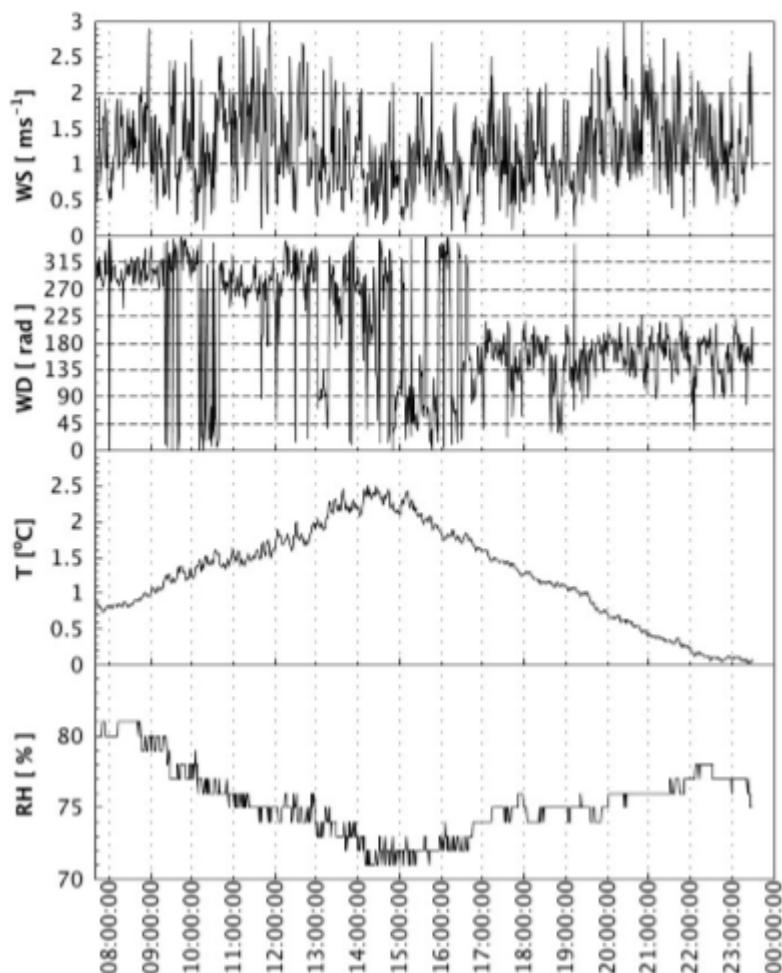
Obrázek 1 - Letecká mapa Mladé Boleslavi s vyznačenými trasami letů SINGLE a SCAN

Tabulka 1 – Přehled letů

Greenwich čas				
	Vzlet	Přistání	Mode	Výška[m]
let 1	7:42:05	8:11:48	SCAN	
let 2	9:40:53	10:20:31	SINGLE	200
let 3	10:38:53	11:15:29	SINGLE	100
let 4	11:47:19	12:23:20	SINGLE	300
let 5	13:15:31	13:52:23	SINGLE	150
let 6	14:21:52	14:56:12	SINGLE	250
let 7	15:28:39	16:08:06	SCAN	
let 8	16:34:46	17:14:38	SCAN	
let 9	17:43:19	18:19:18	SCAN	
let 10	18:44:45	19:14:10	SCAN	
let 11	19:51:28	20:15:30	SCAN	
let 12	20:51:37	21:20:22	SINGLE	100
let 13	21:55:27	22:26:33	SINGLE	200

Současně byla každou vteřinu vzducholodí měřena aktuální teplota, vlhkost vzduchu, směr a síla větru a GPS souřadnice. Teplota se během měření pohybovala mezi 0 – 2,5 °C, relativní vlhkost mezi 70 – 80 %. Vítr během dne vanul rychlostí 0,5 – 3 ms⁻¹ a jeho směr se několikrát změnil. Směr větru má vliv

na polohu oblaků aerosolu pocházejícího ze stacionárního zdroje znečištění (41). Denní průběh uvedených parametrů je znázorněn na grafu 1, kde WS = rychlost větru, WD = směr větru, T = teplota, RH = relativní vlhkost vzduchu.



Graf 1 – Denní průběh rychlosti a směru větru, teploty a relativní vlhkosti vzduchu

4.3. Vyhodnocení dat

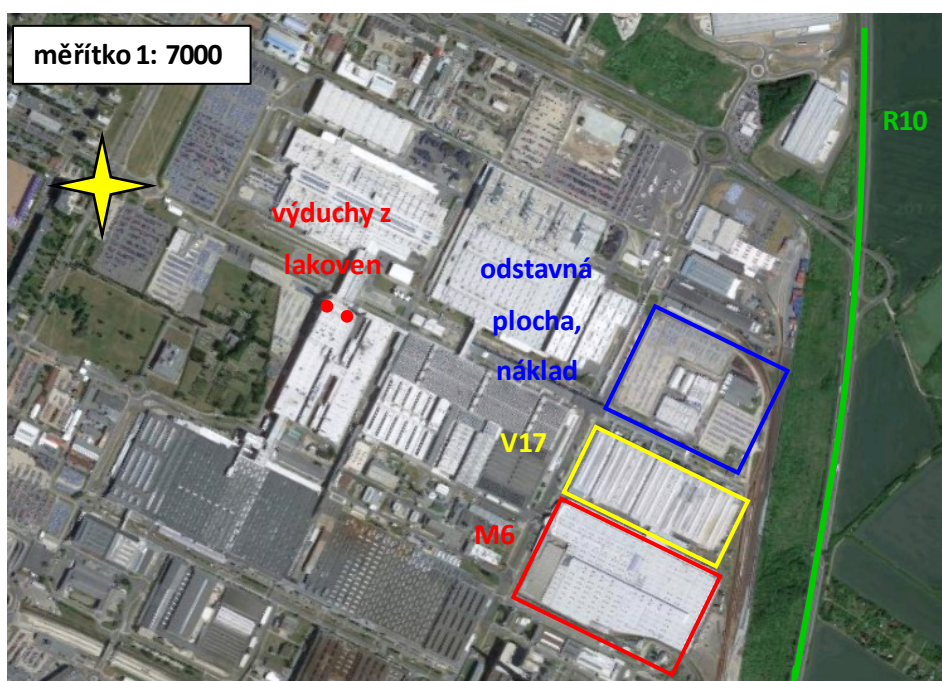
Data získaná z měřicích přístrojů byla následně spárována s GPS souřadnicemi, které v průběhu své trasy vzducholodí zaznamenávala. Chyby v GPS datech (např. chybějící nebo zdvojené hodnoty) byly odstraněny pomocí programu R. V případě SINGLE letů byla data upravena v programu MS Excel do požadované podoby a následně přenesena do programu Arc Map. Výsledkem jsou barevné mapy, znázorňující koncentraci aerosolu (40 nm částic, PM₁, PM_{2.5}, hrubý aerosol (PM₁₀-PM_{2.5})) v jednotlivých bodech trasy vzducholodí, viz kapitola 5.1.

V případě letů v modu SCAN byly průměrná minutové koncentrace a velikostní distribuce aerosolových částic vykreslena pomocí programu CoPlot do grafu znázorňujícího jejich vertikální distribuci. Hodnoty mezi měřenými body byly počítány lineární regresí. Grafickému zpracování opět předcházela úprava dat v programech MS Excel a CoStat. Výsledky měření v modu SCAN jsou uvedeny v kapitole 5.2.

5. Výsledky a diskuze

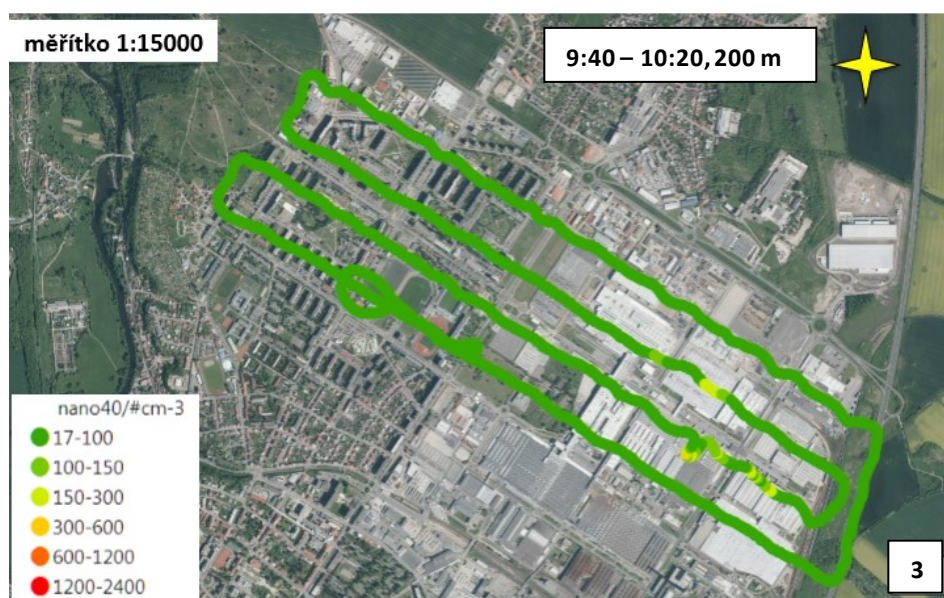
5.1. Výsledky měření v modu SINGLE

V modu SINGLE bylo během dne uskutečněno sedm letů, z toho pět v ranních až odpoledních hodinách (9:40 – 14:56) a dva v nočních hodinách (20:51 – 22:26). Prostoje mezi jednotlivými po sobě jdoucími lety trvaly 15- 50 minut. Mapa objektů identifikovaných jako zdroje aerosolu a zmíněných dále v textu je znázorněna na obr. 2.



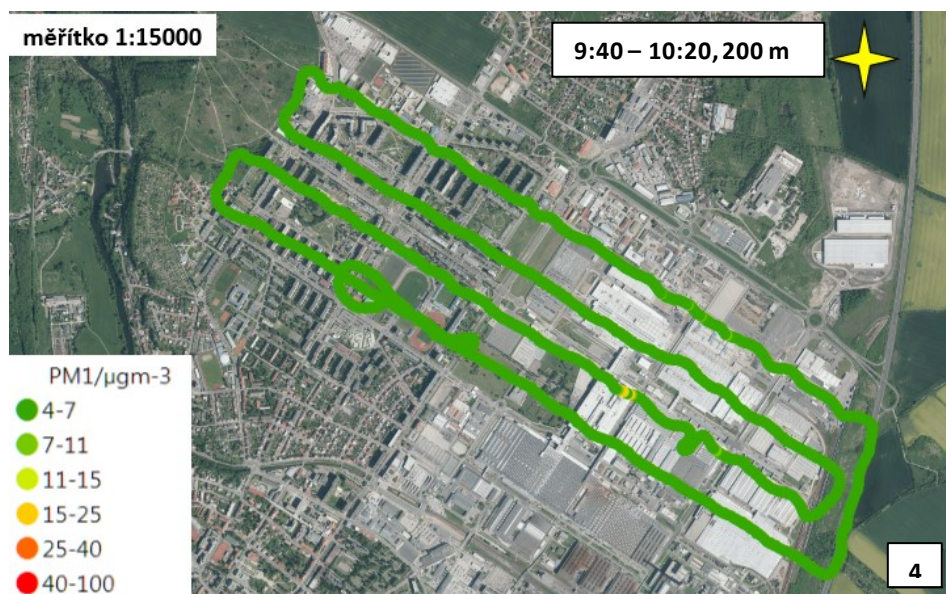
Obrázek 2 – Část průmyslového areálu Škoda Auto a.s. s vyznačenými zdroji znečištění ovzduší

Let č. 2 ve výšce 200 m byl charakteristický nízkými koncentracemi počtu 40nm částic, PM_{10} , $PM_{2,5}$ i hrubého aerosolu ($PM_{10} - PM_1$). V případě nanočástic se koncentrace po většinu trasy letu pohybovala pod 100 částicemi v cm^3 . Koncentrace nebyly zvýšené nad sídlištěm, městskými křižovatkami ani nad komunikací R10. Zvýšená koncentrace byla zaznamenána pouze nad halou V17 a v jejím blízkém okolí, přičemž nejvyšší koncentrace dosahovala maximálně 600 částic v cm^{-3} (obr. 3). V průběhu toho letu vanul SV vítr, který však na šíření částic neměl výraznější vliv.



Obrázek 3 – Koncentrace 40nm částic během letu č. 2, výška 200 m

Jediným zdrojem PM_{10} byly dva 60m komíny vedoucí z lakoven, přičemž nejvyšší koncentrace dosahovala hodnoty $22.68 \mu g m^{-3}$ a šíření znečištění bylo v této letové hladině přísně lokální (obr. 4). Po zbytek letu se naměřené koncentrace pohybovaly v rozmezí $4-7 \mu g m^{-3}$.



Obrázek 4 – Koncentrace PM_1 během letu č. 2, výška 200 m

Koncentrace $PM_{2,5}$ byly během druhého letu oproti PM_1 vyšší, v prostoru nad komíny z lakoven byla naměřena nejvyšší hodnota $94,8 \mu\text{gm}^{-3}$. Po zbytek letu se koncentrace pohybovaly do $18 \mu\text{gm}^{-3}$ (obr. 5 a 6).

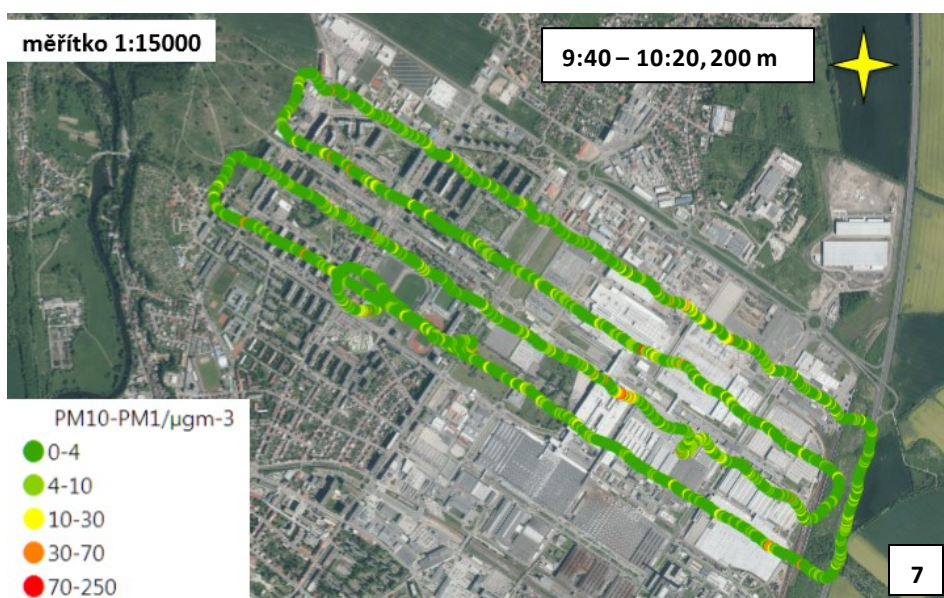


Obrázek 5 – Koncentrace $PM_{2,5}$ během letu č. 2, výška 200 m

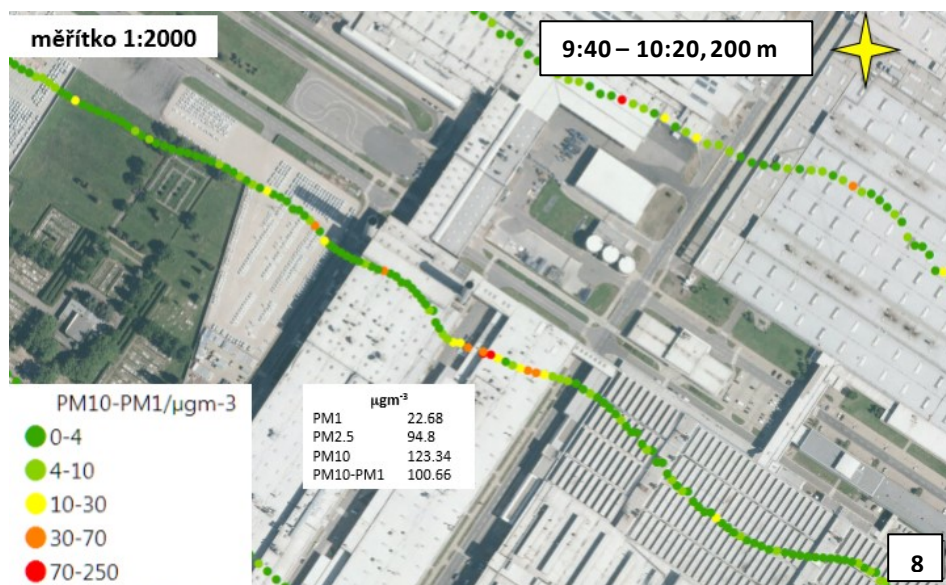


Obrázek 6 - Koncentrace $PM_{2,5}$ během letu č. 2, výška 200 m (detail)

Naměřené koncentrace hrubého aerosolu se po většinu letu pohybovaly mezi 0 - 4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Častěji než u PM_1 a $PM_{2,5}$ jsou zde zaznamenány také hodnoty mezi 10-70 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, které však nejsou vázané na městské křižovatky, parkoviště apod., doprava tedy není významným zdrojem hrubého aerosolu v ovzduší. Výrazněji zvýšená koncentrace byla naměřena opět nad komíny z lakoven a v jejich blízkém okolí, přičemž nejvyšší hodnota se pohybovala okolo 100 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (obr. 7 a 8). Šíření znečištění je obdobné jako v případě PM_1 a $PM_{2,5}$.

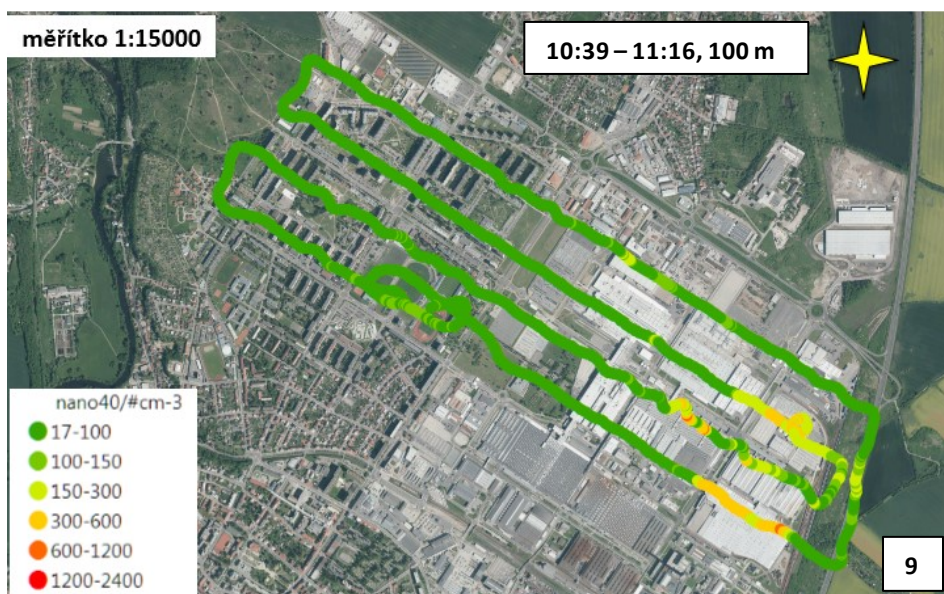


Obrázek 7 - Koncentrace hrubého aerosolu ($PM_{10}-PM_1$) během letu č. 2, výška 200 m

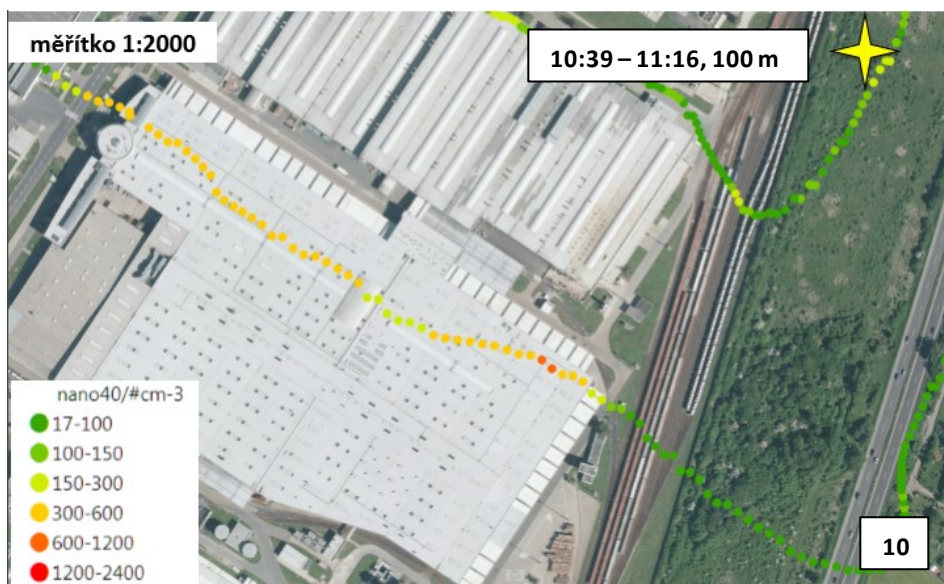


Obrázek 8 - Koncentrace hrubého aerosolu ($PM_{10}-PM_1$) během letu č. 2, výška 200 m (detail)

Během letu č. 3 je ve výšce 100 m patrný nárůst koncentrace počtu 40nm částic oproti prvnímu letu až o jeden řád, a to nad odstavnou plochou, místem nakládky vyrobených automobilů a halami V17 a M6 (obr. 9 a 10). Koncentrace nad těmito budovami se pohybovala mezi 300 a 600 nanočásticemi na cm^3 . Zdrojem částic v tomto případě jednoznačně není komunikace R10. Z obrázku je také patrné, že je možné horizontální šíření oblaku nanočástic jižním směrem mimo měřenou oblast, což odpovídá proudění SV větru během prvních několika minut letu. Po zbytek letu vanul Z vítr. Z porovnání s letem č. 1 vyplývá, že vertikální šíření oblaku nanočástic je omezeno výškou přibližně 200 m. Po zbytek letu se koncentrace nanočástic pohybovaly převážně v rozmezí 17-100 částic v cm^3 .

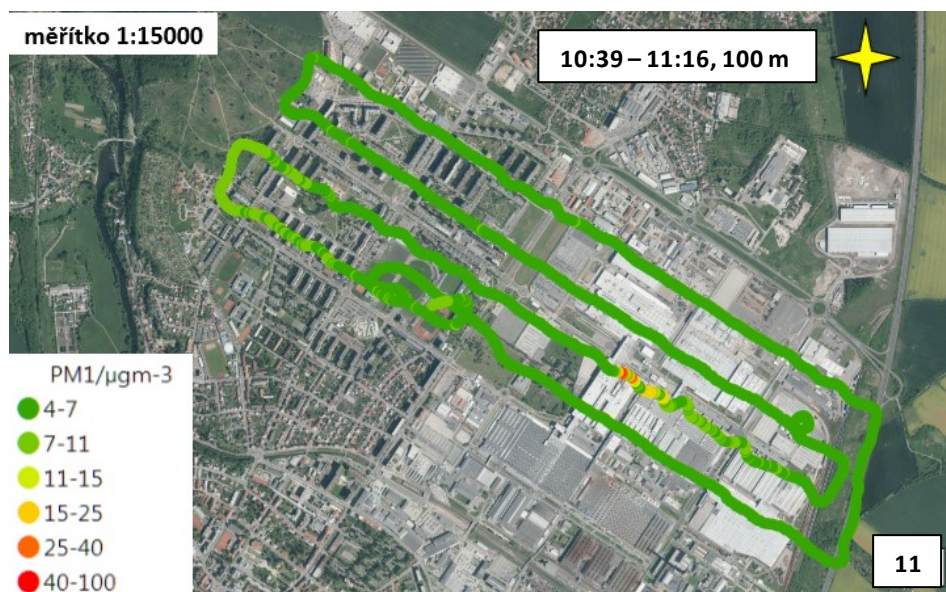


Obrázek 9 – Koncentrace 40nm částic během letu č. 3, výška 100 m



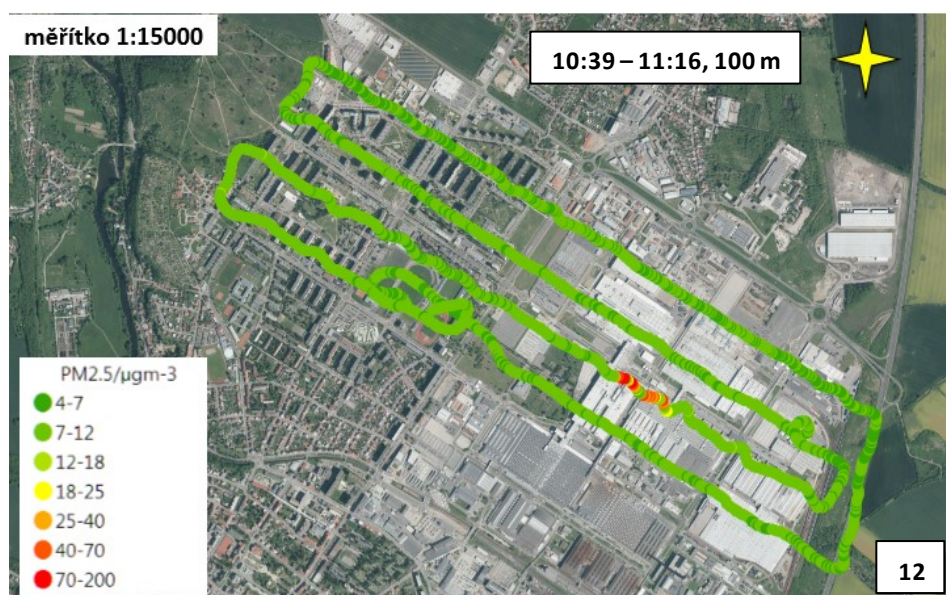
Obrázek 10 - Koncentrace 40nm částic během letu č. 3, výška 100 m (detail)

Výrazný nárůst koncentrace byl zjištěn i u částic PM_{10} a to opět v místě nad komíny vedoucími z lakoven (obr. 11). Maximální koncentrace částic PM_{10} byla oproti 1. letu ve výšce 200 m dvojnásobná – $43,86 \mu g m^{-3}$. Horizontální šíření je opět pouze lokální.

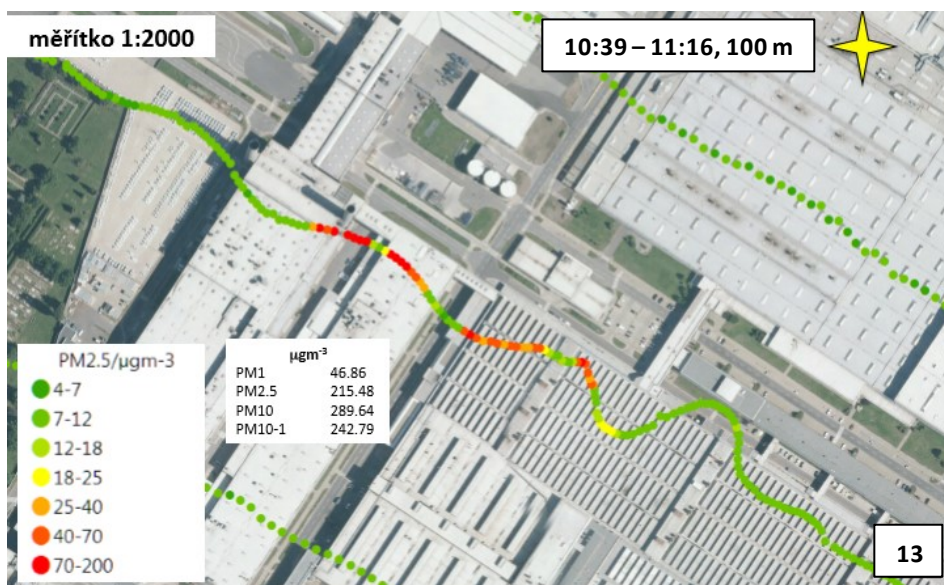


Obrázek 11 – Koncentrace PM_1 během letu č. 3, výška 100 m

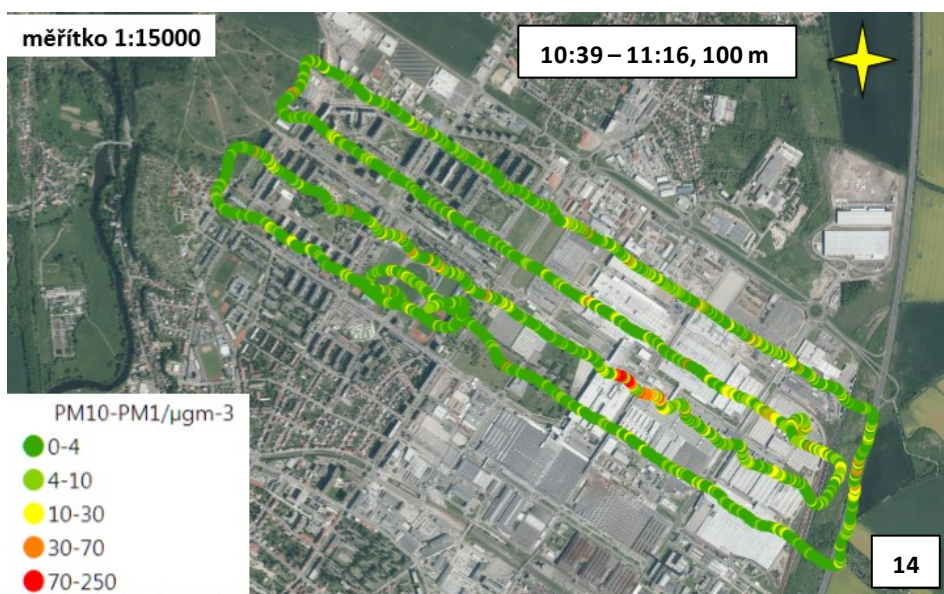
Stejně tak je tomu i v případě $PM_{2,5}$ a hrubých částic. Koncentrace nad komíny z lakoven jsou oproti letu č. 1 a výšce 200 m výrazně zvýšeny, nejvyšší naměřenou hodnotou bylo pro $PM_{2,5}$ $215,48 \mu\text{g m}^{-3}$ a pro hrubý aerosol $242,79 \mu\text{g m}^{-3}$ (obr. 12-14), což je v obou případech více než dvojnásobek. Lakovny jsou v případě PM_1 , $PM_{2,5}$ a hrubého aerosolu jednoznačným zdrojem znečištění, které se ale při obvyklých meteorologických podmínkách nešíří směrem k obytné zóně. Po zbytek trasy zůstávaly koncentrace nízké, stejně jako v případě prvního letu.



Obrázek 12 - Koncentrace $PM_{2,5}$ během letu č. 3, výška 100 m



Obrázek 13 - Koncentrace $PM_{2.5}$ během letu č. 3, výška 100 m (detail)

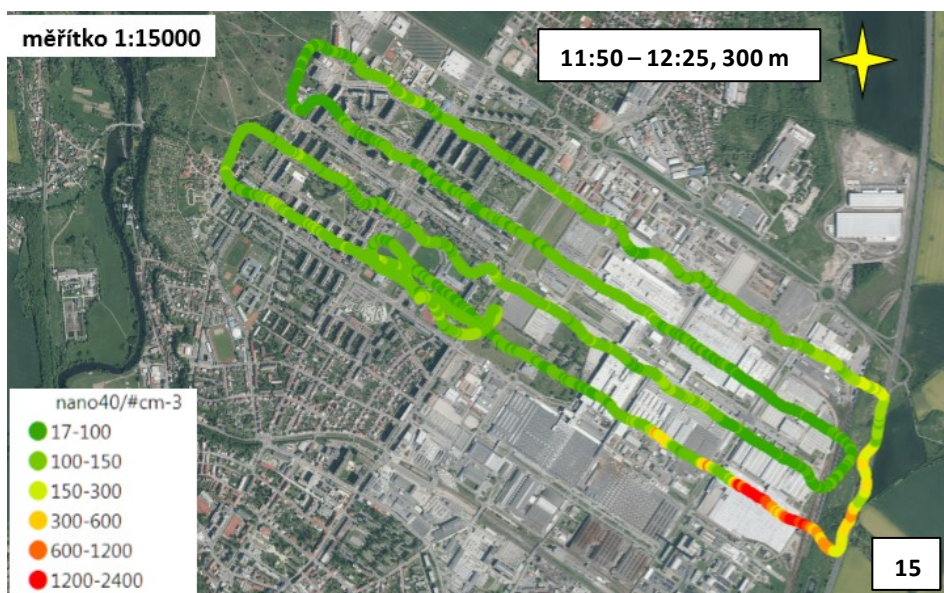


Obrázek 14 - Koncentrace hrubého aerosolu ($PM_{10} - PM_{10}$) během letu č. 3, výška 100 m

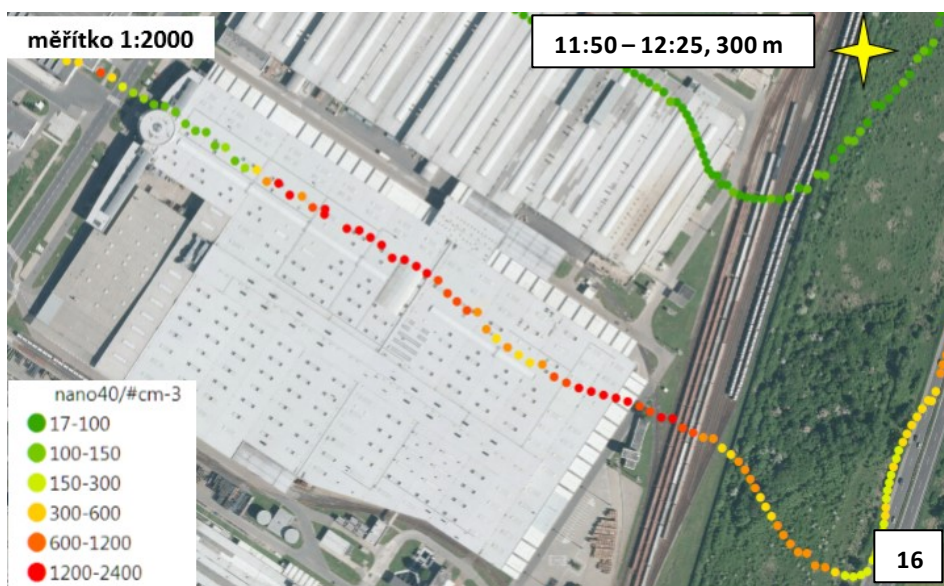
Během následujících tří letů byl pozorován zajímavý průběh koncentrace počtu 40nm částic. V průběhu letu č. 4 ve výšce 300 m vzrostla koncentrace počtu až dvojnásobně ve stejných místech jako v případě předchozího letu (místo nakládky hotových vozů, odstavná plocha, výrobní haly č. V17 a M6), přičemž ani v tomto případě nebyla zdrojem částic komunikace R10 (obr. 15 a 16). Nejvyšší koncentrace se pohybovaly v rozmezí 1200-1400 částic na cm^3 a to přesně na halou M6, odkud jsou pravděpodobně šířeny jižním směrem. Během letu vanul

převážně Z vítr směrem k východu, pouze okolo dvanácté hodiny se jeho směr stočil k SV, což na šíření nanočástic mohlo mít vliv.

V případě tohoto letu je možné, že se jedná o nanočástice, které byly do oblasti transportovány ze vzdáleného zdroje, nebo částice, které vznikly nukleací ve vyšších vrstvách mezní vrstvy atmosféry.



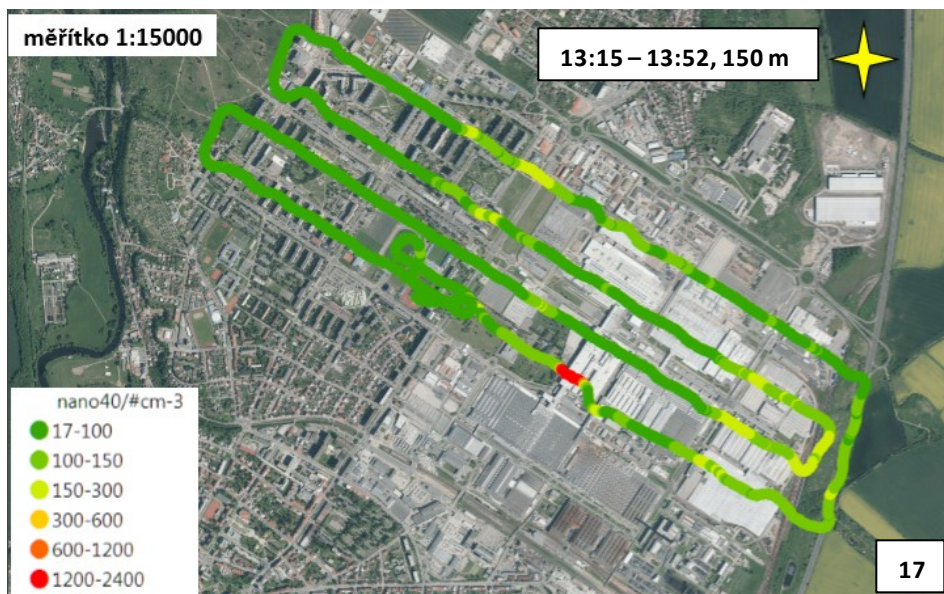
Obrázek 15 – Koncentrace 40nm částic během letu č. 4, výška 300 m



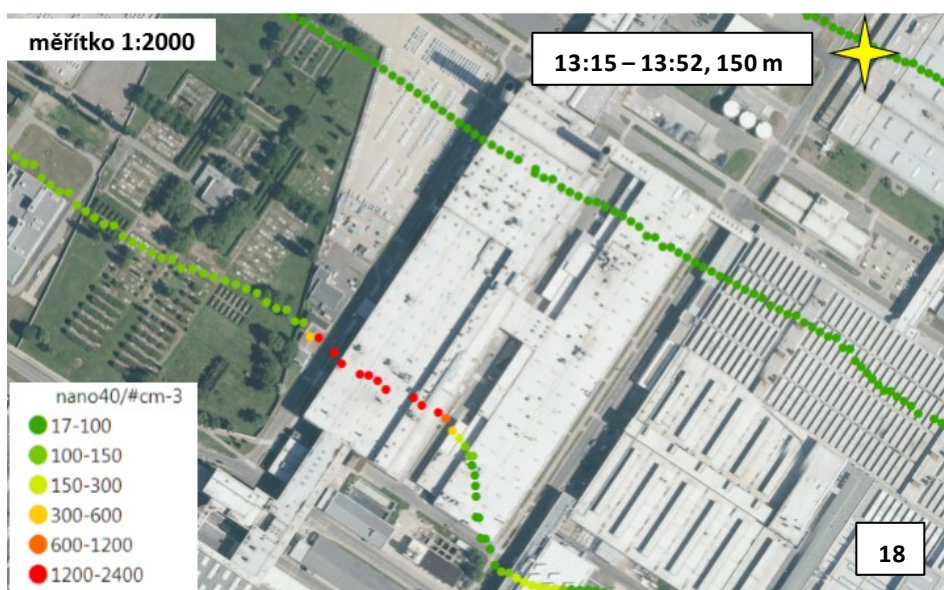
Obrázek 16 - Koncentrace 40nm částic během letu č. 4, výška 300 m (detail)

V následujícím letu č. 5 byla zaznamenána výrazně zvýšená koncentrace počtu 40nm částic ve výšce 150 m nad prostorem lakoven, ne však přímo nad komíny (obr. 17 a 18). Horizontální šíření nanočástic je v tomto případě přísně lokálně

omezeno a nemá na něj vliv ani vítr, jehož směr se během tohoto časového úseku několikrát změnil. Kromě této malé plochy, kde koncentrace dosáhla 1200-2400 částic na cm^3 , byla lehce zvýšená koncentrace nad halami V17, M6 a nad prostorem nakládky, což koresponduje se situacemi během letů 1 a 2 ve výškách 200 a 100 m. Mírně zvýšená koncentrace počtu nanočástic (do 300 nm v cm^3) je pozorovatelná i nad částí obytné zóny.



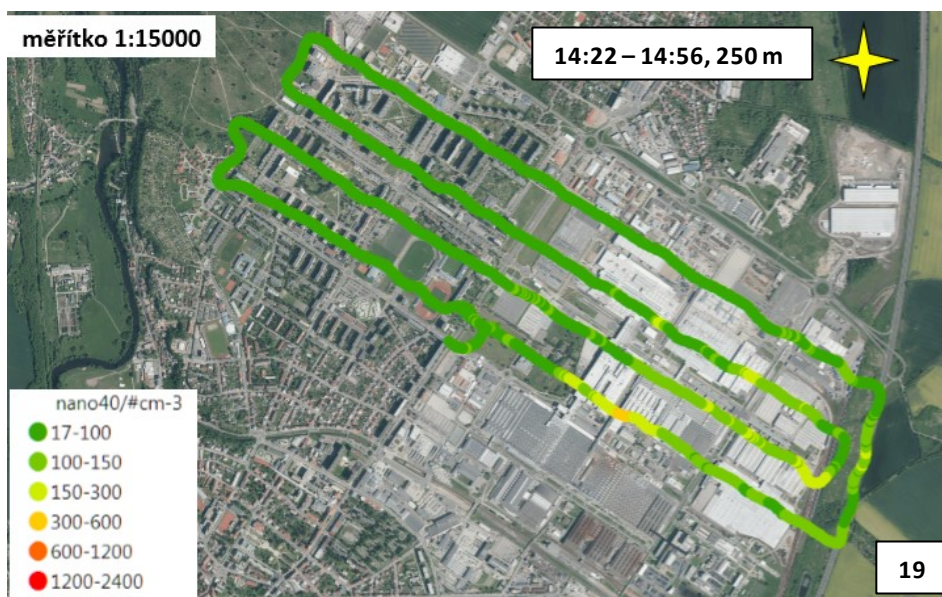
Obrázek 17 - Koncentrace 40nm částic během letu č. 5, výška 150 m



Obrázek 18 - Koncentrace 40nm částic během letu č. 5, výška 150 m (detail)

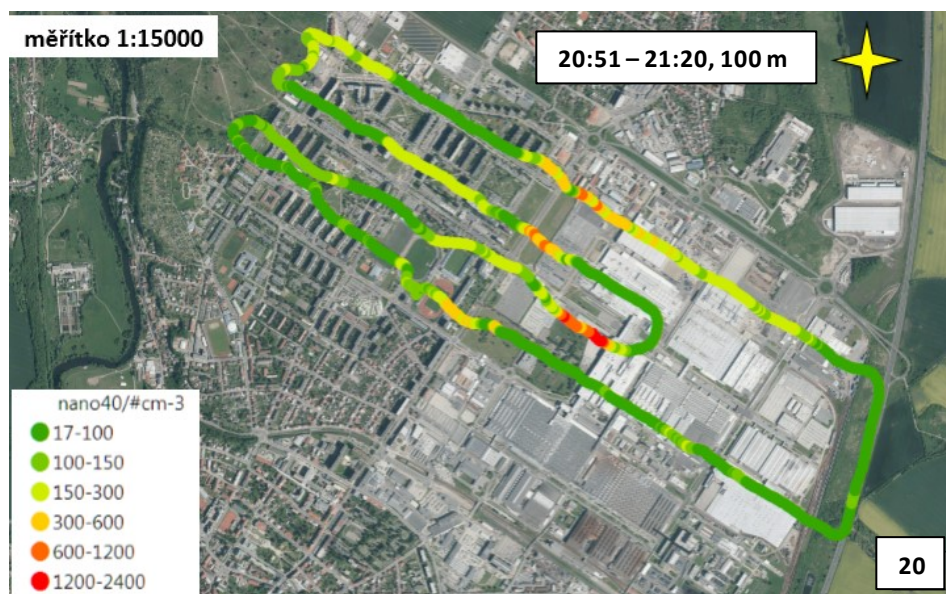
Výrazný pokles koncentrace počtu 40nm částic a jejich postupný rozptyl v blízkosti komínů z lakoven je dobře patrný na mapě z 6. letu ve výšce 250 m (obr. 19). Maximální koncentrace počtu částic v této výšce dosáhly 300-600 částic v cm^3 .

Koncentrace částic PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ a hrubého aerosolu zůstávají během letů 4-6 relativně nízké a stálé.

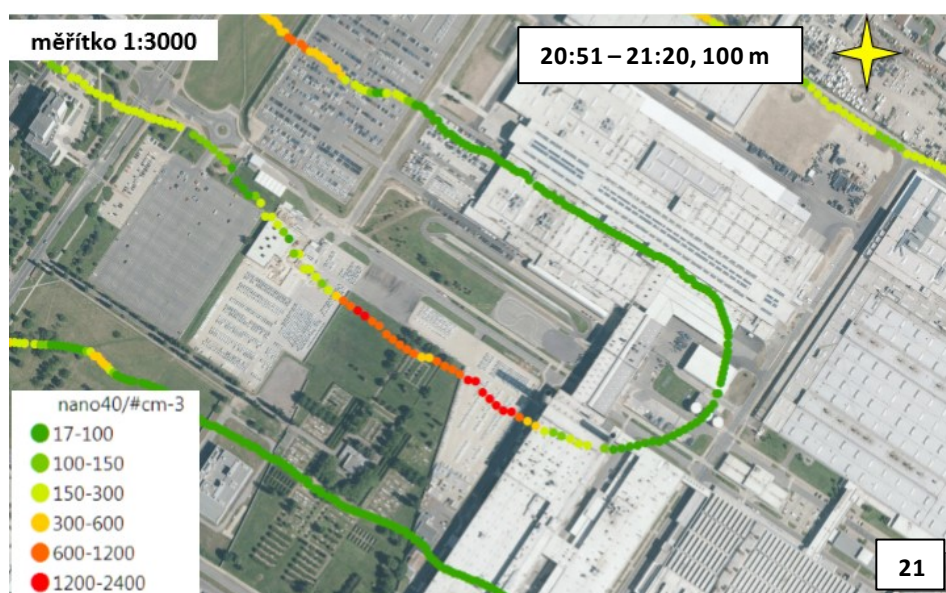


Obrázek 19 - Koncentrace 40nm částic během letu č. 6, výška 250 m

Ve večerních hodinách byla trasa vzducholodi zkrácena z důvodu nižší výdrže baterie při nasvícení vzducholodi. Důsledkem silícího větru jsou také mírné odchylky od naplánované trasy. Na rozdíl od letu č. 5 je na obr. 20-21 z letu č. 12 patná vysoká koncentrace počtu 40nm částic emitovaných přímo z komínů lakoven, které se však nad obytnou zónu šíří minimálně a jsou rozptýleny především nad průmyslovou oblastí v důsledku působení J větru, což odpovídá dennímu chodu větru znázorněnému na grafu č. 1 (obr. 20 a 21).

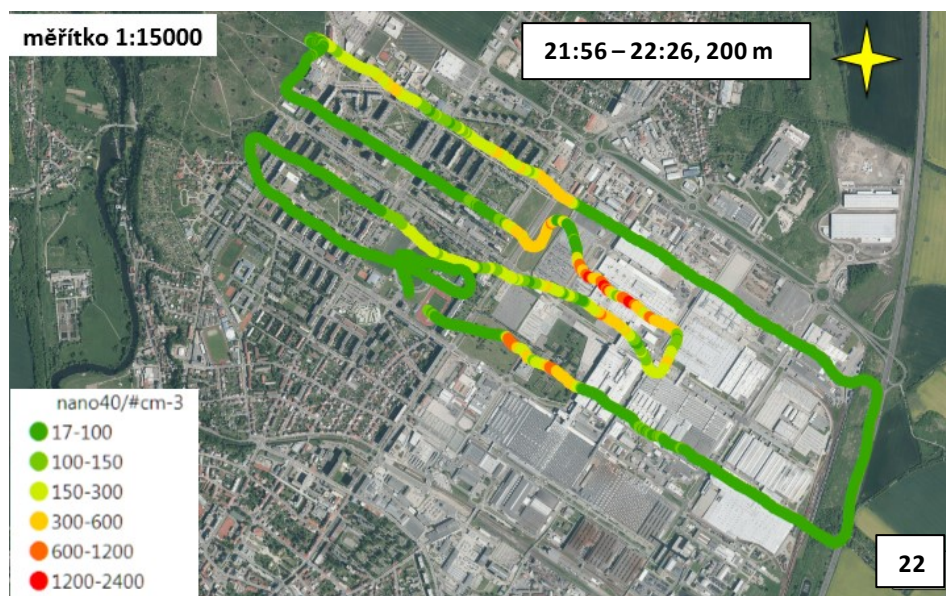


Obrázek 20 - Koncentrace 40nm částic během letu č. 12, výška 100m

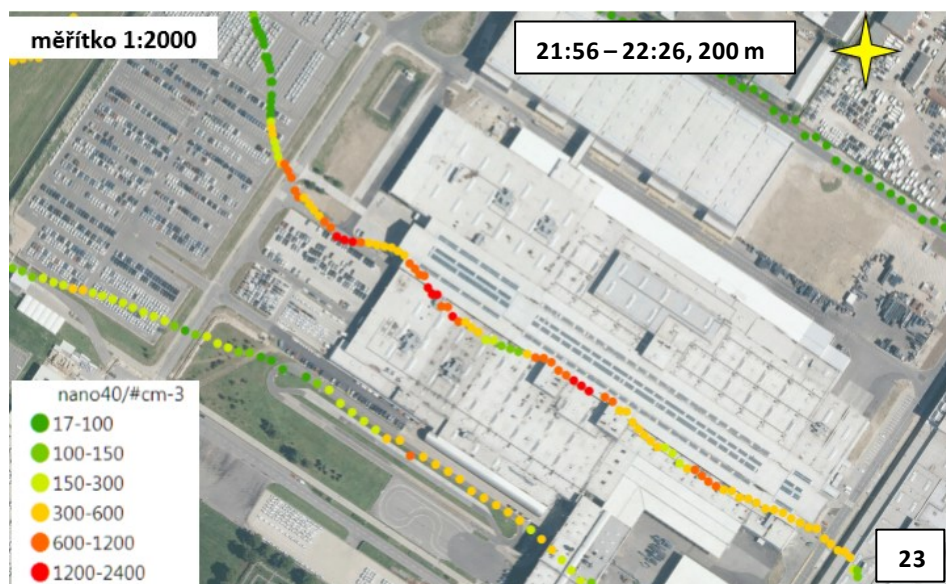


Obrázek 21 - Koncentrace 40nm částic během letu č. 12, výška 100m (detail)

V následujícím, posledním letu ve výšce 200 m byly zaznamenány vysoké koncentrace 40nm částic nad montážemi a svařovnami (obr. 22a 23). Zdrojem nanočástic jsou v tomto případě opět komíny vedoucí z lakoven, ze kterých je oblak nanočástic J a JV větrem unášen směrem na SZ, což koresponduje s denním chodem větru. Po zbytek dne se směr větru již výrazně neměnil.

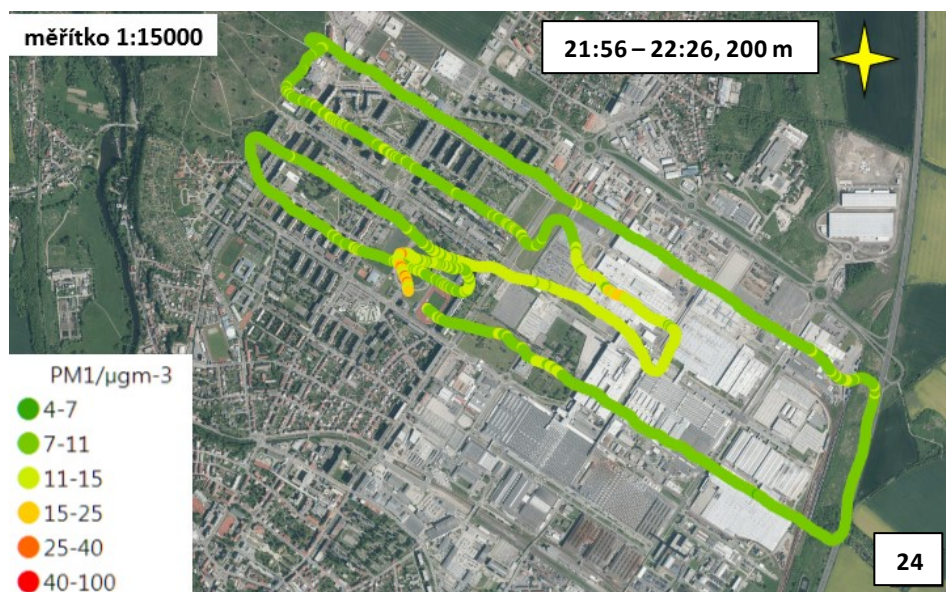


Obrázek 22 - Koncentrace 40nm částic během letu č. 13, výška 200 m

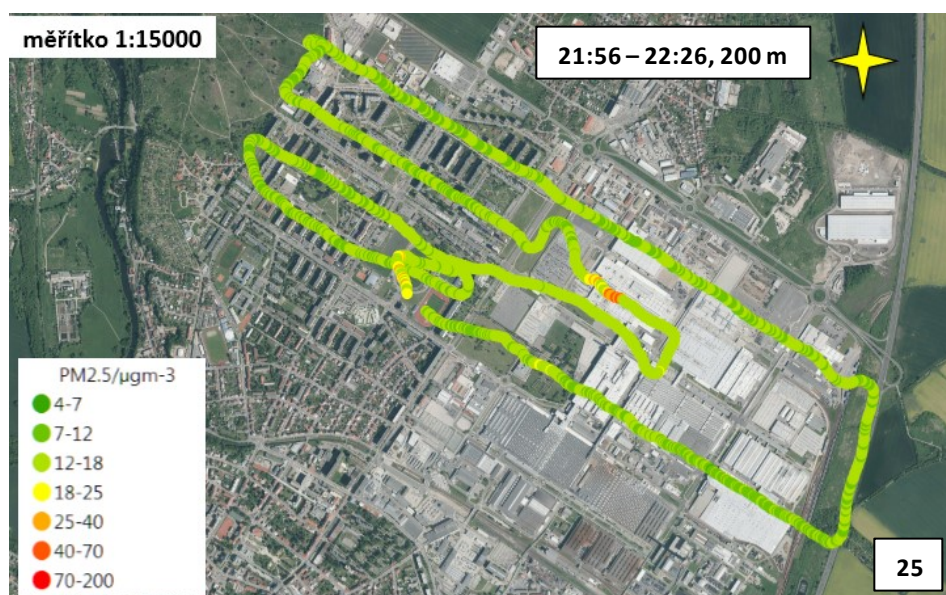


Obrázek 23 - Koncentrace 40nm částic během letu č. 13, výška 200 m (detail)

Zdrojem zvýšené koncentrace PM_{10} a $PM_{2,5}$ během 13. letu jsou montáže a svařovny. Po zbytek trasy byly koncentrace PM_{10} a $PM_{2,5}$ nízké a stálé (do $18 \mu g m^{-3}$), obdobně jako u všech předchozích letů, a znečištění se nešířilo směrem k obytné části města (obr. 24 a 25).



Obrázek 24 - Koncentrace PM_1 během letu č. 13, výška 200 m



Obrázek 25 - Koncentrace $PM_{2.5}$ během letu č. 13, výška 200 m

Vysoké koncentrace počtu 40nm částic během nočních letů č. 12 a 13 korespondují také s výsledky rozptylové studie č. 88/14 vypracované společností EKOME, s.r.o., a to v případě maximální hodinové koncentrace těkavých organických látek (VOC – obr. 26 a 27) a roční průměrné koncentrace benzo[a]pyrenu (B[a]P – obr. 28 a 29). Souvislost mezi velikostí částic a obsahem B[a]P v aerosolu potvrzuje i měření kvality ovzduší v Ostravě v průmyslové zóně Radvanice – Bartovice z roku 2014. Na základě výsledků této kampaně bylo

možné předpovědět, že obohacení ultrajemných částic polyaromatickými uhlovodíky / B[a]P může dosáhnout až 43,8 / 3,5 mg.g⁻¹, pokud se jedná výlučně o částice z průmyslových zdrojů o velikosti 19-44 nm (42).



Obrázek 26 – Maximální hodinová koncentrace VOC ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) a koncentrace 40nm částic během 12. letu, výška 100 m



Obrázek 27 – Maximální hodinová koncentrace VOC ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) a koncentrace 40nm částic během 13. letu, výška 200 m



Obrázek 28 – Roční průměr $B[a]P$ (ngm^{-3}) a koncentrace 40nm částic během 12. letu, výška 100 m



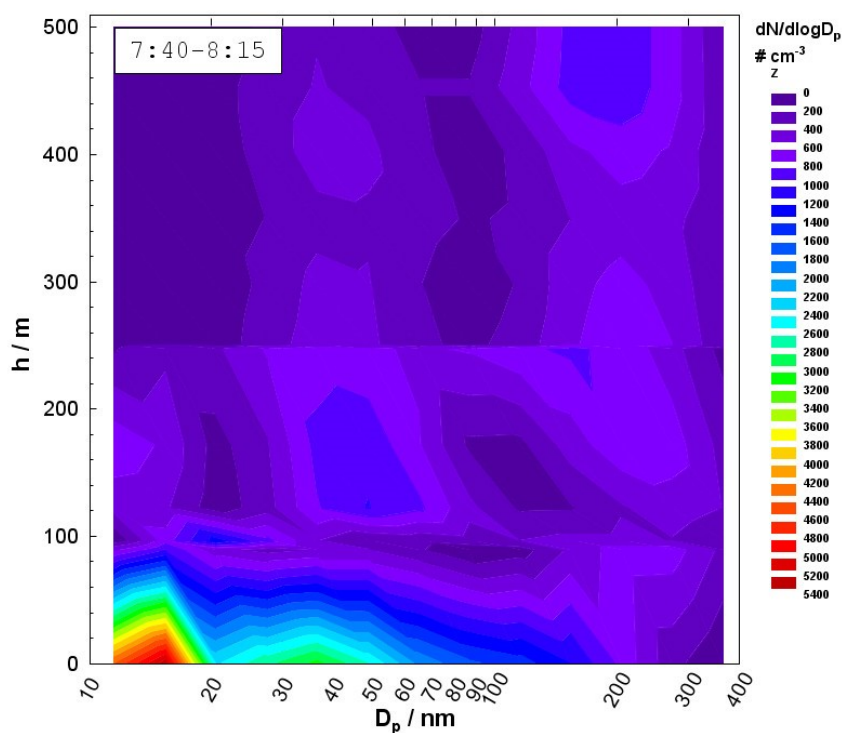
Obrázek 29 – Roční průměr $B[a]P$ (ngm^{-3}) a koncentrace 40nm částic během 13. letu, výška 200 m

5.2. Výsledky měření v modu SCAN

Během dne bylo uskutečněno celkem pět letů v modu SCAN. Během těchto letů létala vzducholod' pouze nad hřištěm Jana Železného a to ve směru SZ – JV trasu dlouhou přibližně 500 m (viz obr. 1). Nejprve vzletla do co největší výšky (max. 600 m nad terénem) a poté postupně klesala, přičemž v každé výškové hladině setrvala přibližně dvě minuty. Během prvního ranního letu (7:42 – 8:11) byla naměřena pouze koncentrace nanočástic. Přístroj OPS nebyl dobře zapojen, koncentrace částic o velikosti 0,338 – 10 μm tedy nejsou k dispozici. Další čtyři

lety byly realizovány v odpoledních hodinách (15:28 – 20:15). Z důvodu nižší výdrže baterie při nasvícení vzducholodi jsou večerní lety kratší.

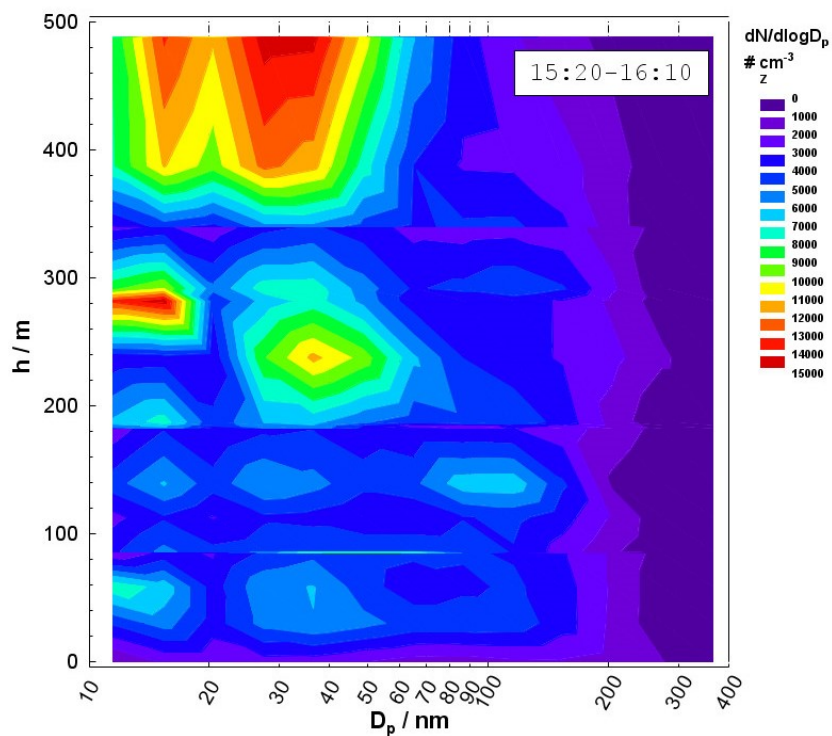
Jak je vidět z následujících obrázků, průběh počtu nanočástic v jednotlivých letových hladinách byl během dne proměnlivý. Na grafech je na ose x vynesena velikost částic v nm, na ose y výška nad terénem a barevně jsou rozlišeny počty částic. Během prvního letu je patrná vysoká koncentrace 15 – 40 nm částic při povrchu země, který je i zdrojem těchto částic (obr. 30). Směrem vzhůru cca do výšky 80 m se koncentrace nanočástic rychle snižují.



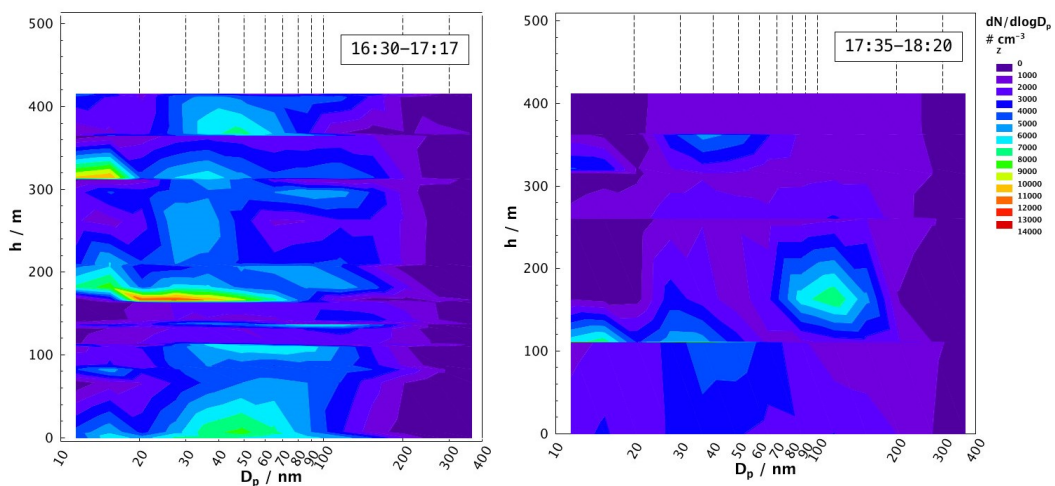
Obrázek 30 – Vertikální profil distribuce nanočástic, let č. 1

Během prvního odpoledního letu v čase 15:20 – 16:10 je naopak vidět největší koncentrace 15 – 40 nm částic ve výšce 500 m. Dále jsou zde patrné oddělené shluky se zvýšenou koncentrací částic o velikosti 10 – 20 nm ve výšce 270 – 300 m a částic o velikosti 30 – 40 nm ve výšce 250 – 300 m (obr. 31). Tyto částice nemají na rozdíl od ranního letu původ na povrchu sídliště, ale jsou do oblasti transportovány odjinud nebo jsou jejich koncentrace zvýšené v důsledku nukleace. Experimentální data potvrzují recentní studie, které dokazují, že k nukleaci dochází ve vyšších vrstvách mezní vrstvy a poté jsou vzniklé částice transportovány k povrchu (43; 44).

Během odpoledne jsou nanočástice postupně rozptýleny, jak je vidět na obrázcích 32-33.



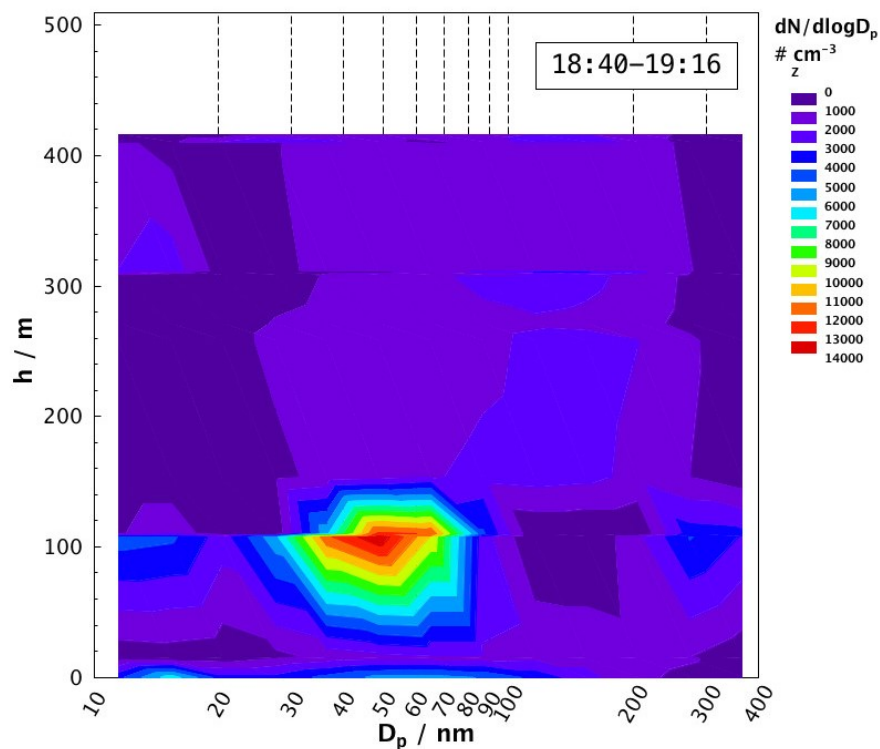
Obrázek 31 – Vertikální profil distribuce nanočástic, let č. 7



Obrázky 32, 33 – Vertikální profil distribuce nanočástic, let č. 9

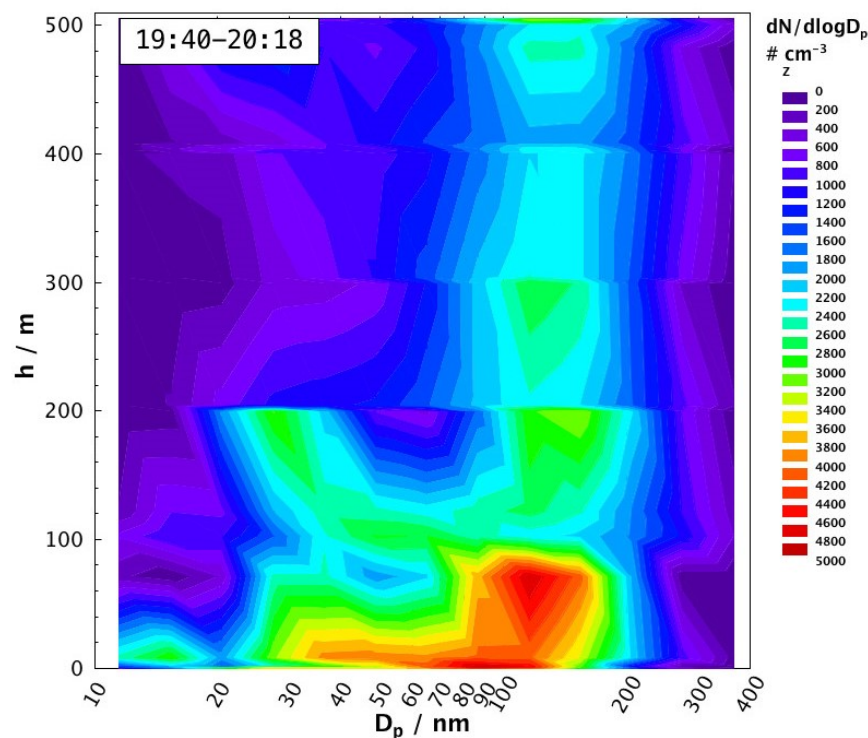
Během desátého letu byl vzducholodí zaznamenán oblak 40 – 50nm částic ve výšce 100 m (obr. 34). Tyto částice jsou stejně jako v případě sedmého

letu (obr. 31) transportovány ze vzdáleného zdroje nebo vznikly nukleací a jejich koncentrace je velmi vysoká – až 14 000 částic v cm^3 .



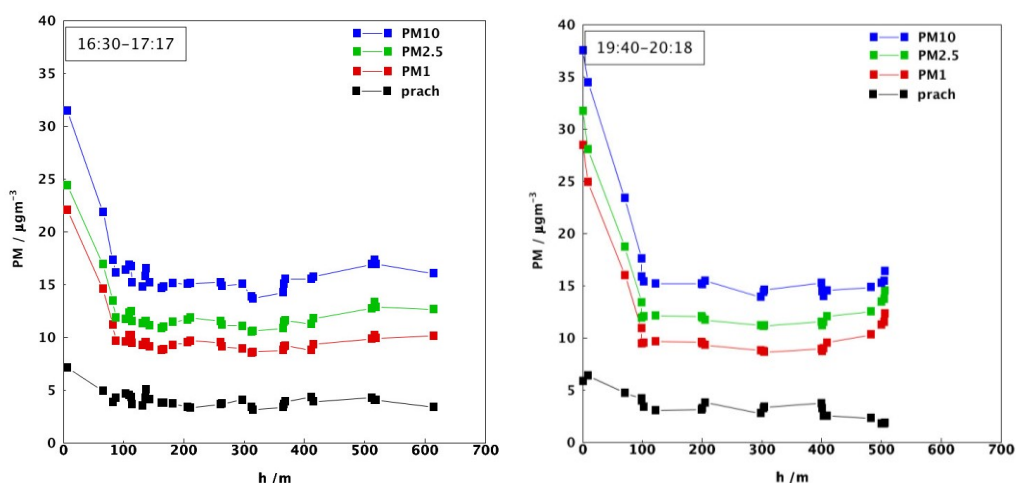
Obrázek 34 – Vertikální profil distribuce nanočástic, let č. 10

Během posledního SCAN letu v 19:40 – 20:18 byl vzducholodí zaznamenán postupný rozptyl cca 150nm částic, které jsou emitovány ze zemské povrchu a jejichž koncentrace je výrazně nižší než při předešlých měřeních – nejvyšší hodnoty dosahují 5000 nanočástic v cm^3 . (obr. 35).



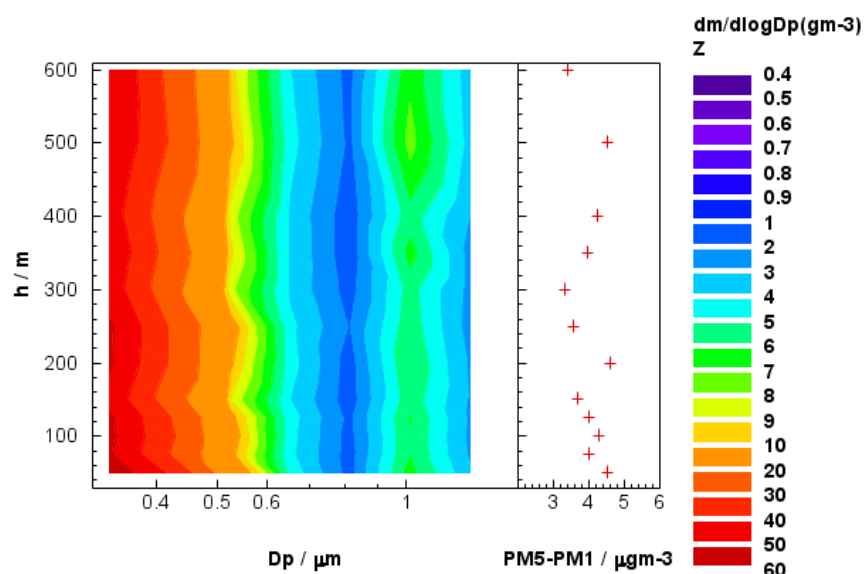
Obrázek 35 – Vertikální profil distribuce nanočástic, let č. 11

Koncentrace částic větších než $0,338 \mu\text{m}$ během všech SCAN letů vykazují podobný průběh. Koncentrace PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ a PM_{10} jsou u každého letu nejvyšší u země, do výšky 100 m koncentrace prudce klesají a následně se ustálí. U hrubého aerosolu se přízemní koncentrace pohybovaly okolo $5 - 10 \mu\text{gm}^{-3}$. Na následujících grafech je na ose x vynesena výška nad terénem a na ose y koncentrace částic v μgm^{-3} .



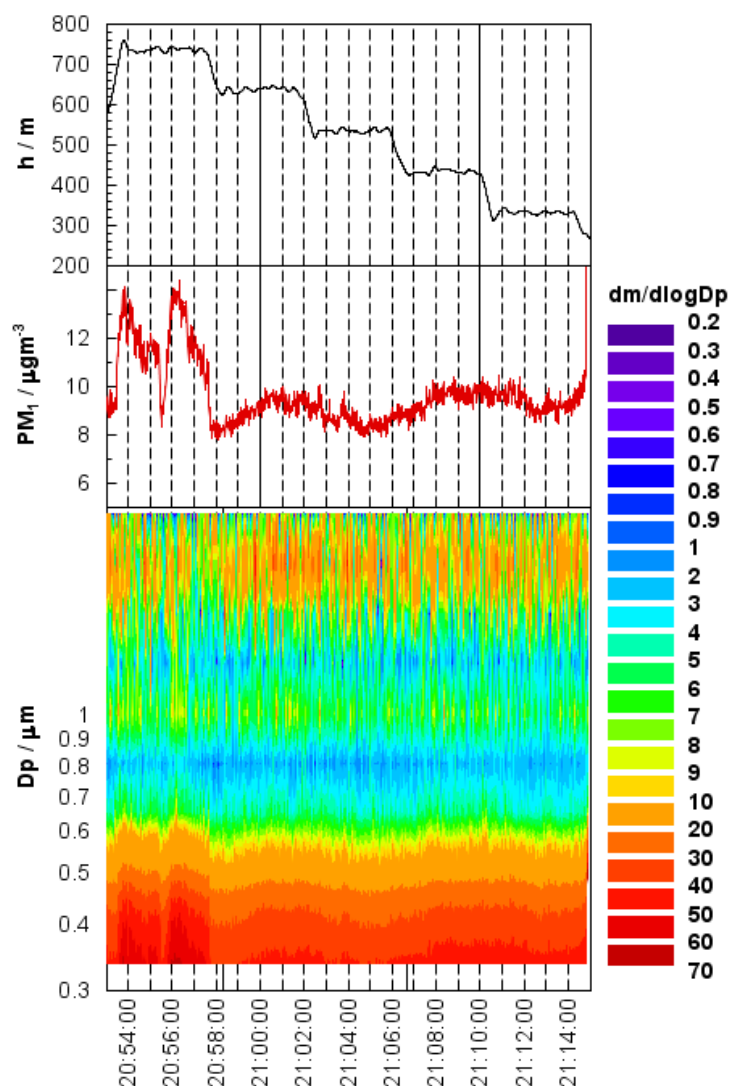
Obrázky 37 a 38 – Průběh koncentrací PM_1 , $\text{PM}_{2,5}$, PM_{10} a hrubého aerosolu během letů č. 8 a 11

Stejný průběh koncentrace dokazuje i následující graf – vertikální profil, kde je na ose x vynesena velikost částic (pouze do 1,5 μm), na ose y výška nad terénem a barevně je vyznačena koncentrace částic. Na grafu vpravo je na ose x znázorněna koncentrace hrubých částic.



Obrázek 38 – Vertikální profil distribucí aerosolu během letu č. 8

Náhlá výrazná změna koncentrace PM_x během letu může být způsobena vychýlením nebo rychlým poklesem vzducholodi, který zapříčinil silný poryv větru – může se tedy jednat o chybové hodnoty. Závislost koncentrace PM_1 na rychlém zakolísání vzducholodi je patrná na obrázku č. 39 a to v čase 20:54 – 20:56. Současně s průběhem PM_1 je zde vynesena výška letu v čase (nahore) a koncentrace všech velikostních frakcí v čase až do velikosti 2,5 μm (dole).



Obrázek 39 – Vertikální distribuce PM1 během celého letu č. 11 v závislosti na pohybu vzducholodi

Provedená letová měření měla doplnit pozemní měření kvality ovzduší v Mladé Boleslavi, které zde proběhlo v únoru a březnu 2013. Na hřišti Jana Železného byla instalována mobilní měřicí stanice, která zaznamenávala koncentrace hrubého i jemného aerosolu a byly zde prováděny chemické analýzy vzorků. Dále bylo na ploše 4,4 km² rozmístěno 9 přístrojů DustTrak DT, které měřily koncentraci PM₁₀ (převážně na střechách budov, jeden přístroj umístěn na kostelní věži v přilehlé vesnici Plazy). Tuto síť doplňovalo mobilní měření, kdy během deseti hodinových procházek byla měřena koncentrace PM₁₀ v obytných zónách MB. Výsledkem této studie bylo zjištění, že největším zdrojem hrubého i jemného aerosolu je spalování dřeva a uhlí v lokálních topeništích. Koncentrace hrubých částic byla výrazně vyšší v pracovních dnech mezi 18-24 hod a o víkendech, navíc

chemická analýza potvrdila, že 82% hmoty hrubých částic a 83% hmoty jemných částic pochází ze spalovacích zdrojů. Podíl dopravy na znečištění se během kampaně výrazně neměnil (cca 17%). Nejmenší podíl na znečištění ovzduší měla podle chemické analýzy průmyslová výroba (1%) (45).

Výsledky letových měření potvrzují, že doprava nemá na koncentraci nanočástic ani mikronových částic nad sídlištěm téměř žádný vliv. Jak ukazují výsledky měření aerosolu v modu SINGLE, zdrojem hrubých i jemných částic nad areálem Škoda Auto jsou výduchy z lakoven, montážní haly a svařovny. Znečištění je ale v tomto případě lokální a není rozptylováno směrem k obytné zóně. Zdrojem znečištění nad sídlištěm mohou tedy být emise transportované do oblasti ze vzdálených zdrojů, jako jsou lokální topeniště v obcích kolem MB, nebo nukleace, což je patrné na obr. 31 a 34 (měření nanočástic v modu SCAN). Průmyslová výroba tedy v tomto případě také výrazně nepřispívá k celkovému znečištění ovzduší.

Tato zjištění kontrastují s výsledky měřicí kampaně, která proběhla v Ostravě v lednu a únoru roku 2012. Během pozemního měření v industriální oblasti Radvanice – Bartovice bylo zjištěno, že největší podíl na produkci hrubého aerosolu mají emise z dopravy (62,3%), následuje tvorba sintru (27,7%), spalování uhlí (16,8%) a tavba železa (8,2%). Částice jemného aerosolu pocházející ze spalování uhlí zde byly zastoupeny z 56,8% (při smogové situaci 68,7%, při post-smogové 28,2%), nicméně přesný zdroj v tomto případě nebylo možné zjistit, protože částice stejného chemického složení mohly pocházet z koksáren, elektráren i lokálních topenišť (46).

6. Závěr

Za účelem zjištění kvality ovzduší ve městě Mladá Boleslav byla v únoru 2015 provedena letová měření nad rozsáhlým průmyslovým areálem Škoda Auto a.s. a přilehnout rezidenční oblastí. Cílem bylo odpovědět na otázku, zda automobilová výroba ovlivňuje kvalitu ovzduší v obytné zóně města a tím i zdraví obyvatelstva.

K měření aerosolu v ovzduší byly použity přístroje Optical Particle Sizer 3330 a NanoScan SMPS Model 3910 umístěné v gondole dálkově říditelné vzducholodi

a vybavené vyhřívanými vzorkovacími hlavicemi. Kampaň se vyznačovala slunečným počasím, proměnlivou rychlostí větru a poměrně vysokou vlhkostí vzduchu. Během dne bylo realizováno celkem 13 letů a to v modech SCAN a SINGLE. V případě letů SINGLE byla naplánována přesná trasa, kterou vzducholoď kopírovala při každém letu v různých výškových hladinách. Výsledkem měření v modu SINGLE jsou barevné mapy, na kterých jsou vykresleny koncentrace 40nm nanočástic, PM₁, PM_{2,5} a hrubého aerosolu (PM₁₀ - PM₁) v jednotlivých bodech trasy. Měření v modu SCAN probíhalo pouze nad sportovním areálem, kdy vzducholoď létala v jedné linii a během letu postupně stoupala až do výšky maximálně 600 m nad zemí. Výsledkem měření v tomto modu jsou vertikální profily koncentrací částic celého měřeného velikostního spektra (11,5 nm – 10 μm).

Výsledky kampaně měly doplnit pozemní měření, které v Mladé Boleslavi proběhlo v roce 2013. Během tohoto měření bylo zjištěno, že na znečištění ovzduší v rezidenční části města má největší vliv spalování v lokálních topeništích, zatímco doprava a průmysl kvalitu ovzduší výrazně neovlivňují. Toto zjištění bylo letovými měřeními v únoru 2015 potvrzeno.

Ačkoliv bylo nad průmyslovým areálem identifikováno hned několik zdrojů znečištění, horizontální šíření aerosolu bylo ve všech případech lokální a částice nebyly transportovány nad obytnou zónu. Nejvýrazněji se z měřených velikostních frakcí aerosolu na znečištění podílely 40nm částice, jejichž zdrojem byly v některých případech lakovny a výrobní haly, v jiných případech byly částice do oblasti transportovány ze vzdálenějších zdrojů nebo vznikly nukleací ve vyšších vrstvách mezní vrstvy atmosféry, což potvrzují i výsledky měření vertikálního profilu v modu SCAN. Koncentrace PM₁, PM_{2,5} a hrubého aerosolu byly během měřicí kampaně nízké a téměř konstantní, zvýšené koncentrace byly zaznamenány pouze přímo nad komíny vedoucími z lakoven. Zdrojem hrubého aerosolu překvapivě nebyla ani komunikace R10, vedoucí okolo průmyslové zóny, a městské komunikace, křižovatky a parkoviště.

Na rozdíl od výsledků měření, které proběhlo v Ostravě v roce 2012 a kde průmysl významně ovlivňuje kvalitu ovzduší v obytných zónách, Mladá Boleslav je dobrým příkladem města, kde může fungovat průmyslová výroba bez většího vlivu na kvalitu ovzduší v obytných zónách.

Současné technické prostředky bohužel neumožňují takto rozsáhlé proměření vícero GPS souřadnic ani letových hladin současně, aby byla získána naprosto přesná data o prostorové distribuci atmosférického aerosolu v mezní vrstvě. Letová měření za pomoci bezpilotních prostředků prozatím přinášejí nepřesnější možné informace o distribuci znečištění ovzduší v urbánních oblastech.

7. Seznam literatury

1. **Víden, Ivan.** *Chemie ovzduší*. Praha : VŠCHT, 2005. stránky 41-43.
2. **Bednář, Jan.** *Vybrané kapitoly z meteorologie*. Praha : Karlova univerzita, 1985.
3. **Braniš, Martin a Hůnová, Iva.** *Atmosféra a klima, Aktuální otázky ochrany ovzduší*. Praha : Karolinum, 2009. stránky 131-139.
4. **Hinds, William C.** *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*. New York : John Wiley a Sons, 1999.
5. **Hůnová , Iva a Šantroch, Jiří.** Právní předpisy Evropské unie a jejich důsledky pro monitorování prašného aerosolu (PM10) pro Českou republiku. *Ochrana ovzduší*. 2000, 6, stránky 1-3.
6. **C. Arden Pope III, Douglas W. Dockery.** Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect. *Journal of the Air and Waste Management Association* . 2006, stránky 709-742.
7. **World Health Organization.** Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide. *Report on a WHO Working Group*. 2003, stránky 7-8.
8. **Pöschl, Ulrich.** Atmospheric Aerosols: Composition, Transformation, Climate and Health Effects. *Angewandte Chemie*. 2005, 44(46), stránky 7520-7540.
9. **U. Lohmann, J. Feichter.** Global indirect aerosol effects: a review. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2005, 5, stránky 715-737.
10. **Houghton, J. T., a další.** *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge : THE PRESS SYNDICATE OF THE UNIVERSITY OF CAMBRIDGE, 2001. str. 24.
11. **WHO, Regional office for Europe.** Air Quality Guidelines for Europe, 2nd edition. *WHO Regional Publications, European Series*. 2000, 91, str. 35.
12. **Rai, Prabhat Kumar.** Impacts of particulate matter pollution on plants: Implications for environmental biomonitoring. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2016, 129, stránky 120-136.

13. **S. Tiwari, M. Argawal, F. M. Marshall.** Evaluation Of Ambient Air Pollution Impact On Carrot Plants At A Sub Urban Site Using Open Top Chambers. *Environemntal Monitoring and Assessment*. 2006, 119(1), stránky 15-30.
14. **United States Environmental and Protection Agency.** Particle Pollution and your Health. 2003.
15. **Pope, C. A.** Epidemiology of fine particulate air pollution and human health: biologic mechanisms and who's at risk? *Environmental Health Perspectives*. 2000, 108(4), stránky 713-722.
16. **Lee, Seung–Bok, Bae, Gwi–Nam a Lee, Jae Young.** A review of the association between air pollutant exposure and allergic. *Atmospheric Pollution Research*. 2014, 5, stránky 616-629.
17. **Kulkarni, Pramod, Baron, Paul A. a Willeke, Klaus.** *Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications, Third Edition*. Hoboken : A Wiley a Sons. Inc. Publication, 2011. str. 10.
18. **Lisenko, S. A. a Kugeiko, M.M.** Nephelometric Method for Measuring Mass Concentrations of Urban Aerosols and their Respirable Fractions. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2014, 27(6), stránky 587-595.
19. **Finlayson-Pitts, Barbara J. a Pitts, James N. .** *Chemistry of the Upper ale Lower Atmosphere*. U.S.A. : Academic Press, 1999.
20. **Hovorka , Jan, a další.** Aerosol Distribution in The Planetary Boundary Layer Aloft a Residential Area. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2016, 44.
21. **Jiannong, Quan, a další.** Evolution of planetary boundary layer under different weather conditions, and its impact on aerosol concentrations. *Particuology*. 2013, 11(1), stránky 34-40.
22. **Barnes, R., Pipes, J. a Sharma, N. C. P.** MEASURING AEROSOL OPTICAL DEPTH (AOD) AND AEROSOL PROFILES SIMULTANEOUSLY WITH A CAMERA LIDAR. *EPJ Web of Conferences*. 2016, 119(02007).
23. **Johnson, B. T. , a další.** Measurements of aerosol properties from aircraft, satellite and ground-based remote sensing: A case-study from the Dust and Biomass-

burning Experiment (DABEX). *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2009, 135(641), stránky 922–934.

24. **Li, Can, a další.** Aircraft measurements of SO₂ and aerosols over northeastern China: Vertical profiles and the influence of weather on air quality. *Atmospheric Environment*. 2012, 62, stránky 492–501.

25. **Brady, James M. , a další.** Characterization of a Quadrotor Unmanned Aircraft System for Aerosol-Particle-Concentration Measurements. *Environmental Science and Technology*. 2016, 50(3), stránky 1376–1383.

26. **Corrigan, C. E. , a další.** Capturing vertical profiles of aerosols and black carbon over the Indian Ocean using autonomous unmanned aerial vehicles. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2008, 8, stránky 737–747.

27. **Dočekalová, Veronika.** *Vertikální distribuce aerosolu v mezní vrstvě atmosféry*. Praha, 2015.

28. **Keder, Josef a Engst, Pavel .** *Vyhodnocení připravenosti České republiky splnit požadavky na kvalitu ovzduší podle směrnic EU a Konvence LRTAP: příloha DU03-2.E1-E2 (Zpráva za řešení etapy úkolu)*. Praha, 2000. stránky 6–7.

29. **Frick, G.M. a Hoppel, W.A.** Airship Measurements of Aerosol Size Distributions, Cloud Droplet Spectra, and Trace Gas Concentrations in the Marine Boundary Layer. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1993, 11, stránky 2195–2202.

30. **Frick, G. M. a Hoppel, W. A.** Airship Measurements of Ship's Exhaust Plumes and Their Effect on Marine Boundary Layer Clouds. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2000, Sv. 57, stránky 2625–2648.

31. **Nieminen, T. .** Technical note: New particle formation event forecasts during PEGASOS–Zeppelin Northern mission 2013 in Hyytiälä, Finland. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2015, 15, stránky 12385–12396.

32. **Hamed, A. , a další.** New Particle Formation at Po-Valley during PEGASOS Campaign. *Nucleation and Atmospheric Aerosols*. 2013, stránky 226–229.

33. **CAFE Working Group on Particulate Matter.** *Second Position Paper on Particulate Matter*. 2004. str. 8.

34. **Hůnová, I. , Šantroch, J. a Ostatnická, J.** Ambient air quality and deposition trends at rural stations in the Czech Republic during 1993-2001. *Atmospheric Environment*. 2004, 38(6), stránky 887-898.
35. **Šmejkalová, Marie.** *Analýza dlouhodobého vývoje hlavních znečišťujících látek v ovzduší v ČR*. Praha, 2010. str. 12.
36. **Český hydrometeorologický ústav.** <http://portal.chmi.cz>. [Online] 2014.
http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/14groc/gr14cz/IV1_PM_CZ.html.
37. **Gehring, Robert a Buchmann, Brigitte.** Characterising seasonal variations and spatial distribution of ambient PM10 and PM2.5 concentrations based on long-term Swiss monitorin data. *Atmospheric Environment*. 2003, 37(19), stránky 2571-2580.
38. **Novák, Jiří a Velíšek, Jan.** Lokální topeniště - spalování dřeva. *Ochrana ovzduší*. 2010, 4, stránky 30-35.
39. **Ministerstvo životního prostředí.** *Národní program snižování emisí České Republiky*. Praha : MŽP, 2015. stránky 15-17.
40. **Škoda Auto a.s.** *Výroční zpráva 2015*. Praha : Škoda Auto a.s., 2016. str. 19.
41. **Hovorka, J.** *Zpráva k řešení externí kooperace - Stanovení prostorového rozložení koncentrací atmosférického aerosolu v mezní vrstvě atmosféry nad Mladou Boleslaví*. Praha, 2015.
42. **Leoni, C., a další.** Source Impact Determination using Airborne and Ground Measurements of Industrial Plumes. *Environmetal Science and Technology*. 2016, 50(18), stránky 9881-9888.
43. **J. Hovorka, C. Leoni, N. Kuželová, J. Bendl, O. F. Bishof.** *Dynamics of Nanoparticle Size Distribution in a Boundary Layer by an Airborne and Ground Measurements*. 2017.
44. **Platis, Andreas, a další.** An Observational Case Study on the Influence of Atmospheric Boundary-Layer Dynamics on New Particle Formation. *Boundary Layer Meteorology*. 2016, stránky 66-92.
45. **Hovorka, J. , a další.** Wood combustion, a dominant source of winter aerosol in residential district in proximity to a large automobile factory in Central Europe. *Atmospheric environment*. 2015, 113, stránky 98-107.

46. **Pokorná, P. , a další.** Source apportionment of size resolved particulate matter at a European air pollution hot spot. *Science of the Total Environment*. 2015, 502, stránky 172-183.
47. **Ministerstvo životního prostředí.** *Národní program snižování emisí České republiky*. Praha, 2007. str. 13.
48. **Tuch, T., a další.** Variation of particle number and mass concentration in various size ranges of ambient aerosols in Eastern Germany. *Atmospheric Environment*. 1997, 31(24), stránky 4193-4197.